

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**UNIVERSIDAD CARLOS III**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**



**TRABAJO FIN DE GRADO:**

**DISEÑO DE UN CHASIS LIGERO  
MONOVIGA PARA UNA  
MOTOCICLETA OFFROAD**

**AUTOR: YAGO NÚÑEZ GAMONEDA**

**TUTOR: GUILLERMO MAGAZ PILAR**

**LEGANÉS - JUNIO 2016**



*“Dadme un punto de apoyo y moveré el mundo”*

*Arquímedes de Siracusa (287 a.c. – 212 a.c.)*

# ÍNDICE

<b>Memoria .....</b>	<b>- 5 -</b>
Resumen .....	- 12 -
I. Conocimiento de la motocicleta.....	- 13 -
1. Introducción a la motocicleta .....	- 13 -
2. Historia de la motocicleta .....	- 15 -
3. Elementos de la motocicleta .....	- 22 -
a) Ruedas.....	- 22 -
b) Frenos.....	- 22 -
c) Suspensiones.....	- 23 -
d) Sistema de dirección .....	- 24 -
e) Chasis.....	- 24 -
f) Motor .....	- 25 -
g) Basculante .....	- 26 -
h) Transmisión .....	- 26 -
i) Escape.....	- 27 -
4. Conceptos teóricos .....	- 28 -
a) Distancia entre ejes.....	- 28 -
b) Avance .....	- 29 -
c) Ángulo de lanzamiento .....	- 31 -
d) Otras consideraciones .....	- 32 -
5. Conocimiento del chasis .....	- 38 -
a) Evolución temporal .....	- 38 -
b) Tipos de chasis.....	- 43 -
c) El motor como elemento estructural.....	- 50 -
d) Chasis de off-road .....	- 51 -
e) Proceso de modelado y fabricación .....	- 53 -

II.	Programas usados .....	- 56 -
1.	Diseño del chasis.....	- 56 -
a)	Introducción al concepto de CAD.....	- 56 -
b)	Introducción al programa SolidWorks .....	- 57 -
c)	Diseño intencional.....	- 61 -
d)	Parametrización y forma de trabajo .....	- 62 -
2.	Estudio FEM .....	- 64 -
a)	Introducción a FEM .....	- 64 -
b)	Análisis estático.....	- 72 -
c)	Sujeciones.....	- 74 -
d)	Cargas .....	- 76 -
e)	Contactos y conexiones.....	- 78 -
III.	Diseño del chasis.....	- 81 -
1.	Chasis original .....	- 81 -
2.	Requerimientos estructurales .....	- 83 -
3.	Decisiones estructurales .....	- 85 -
4.	Elección del material.....	- 89 -
a)	Introducción a los materiales.....	- 89 -
b)	Propiedades de los materiales más aptos.....	- 91 -
c)	Elección del material .....	- 98 -
5.	Modelado del chasis .....	- 100 -
6.	Diseño final del chasis.....	- 108 -
7.	Diseño del protector de cadena .....	- 121 -
IV.	Evaluación del chasis .....	- 124 -
1.	Introducción y consideraciones .....	- 124 -
2.	Mallado del chasis.....	- 126 -
3.	Imposición de restricciones .....	- 130 -

---

4.	Aplicación de los esfuerzos .....	- 132 -
5.	Estudio de los casos críticos.....	- 133 -
a)	Frenada máxima .....	- 133 -
b)	Aceleración máxima .....	- 139 -
c)	Paso por curva .....	- 145 -
d)	Salto cayendo primero con la rueda delantera.....	- 151 -
e)	Salto cayendo primero con la rueda trasera.....	- 156 -
6.	Estudio del chasis a fatiga .....	- 163 -
V.	Conclusiones.....	- 169 -
1.	Conclusiones generales.....	- 169 -
2.	Futuras líneas de trabajo .....	- 170 -
VI.	Bibliografía .....	- 171 -
	<b>Presupuesto .....</b>	<b>- 173 -</b>
	<b>Planos .....</b>	<b>- 175 -</b>



# Memoria

### Índice de imágenes

- Fig. 1 – Honda CRF 250 modelo 2016
- Fig. 2 – Primera motocicleta de Howard Roper
- Fig. 3 – Motocicleta de Maybach y Daimler
- Fig. 4 – Motocicleta de Hidelbrand y Wolfmüller
- Fig. 5 – Motocicleta de los hermanos Werner
- Fig. 6 – Scooter de George Gauthier
- Fig. 7 – Motocicleta FN Four
- Fig. 8 – Motocicleta Triumph Speed Twin
- Fig. 9 – Motocicleta Gilera Saturno
- Fig. 10 – Motocicleta Honda CB 450
- Fig. 11 – Motocicleta Honda CB 750
- Fig. 12 – Motocicleta Honda CBR 1000 rr
- Fig. 13 – Rueda de off-road
- Fig. 14 – Rueda de carretera
- Fig. 15 – Freno de disco
- Fig. 16 – Conjunto de amortiguación: horquilla telescópica y amortiguador trasero
- Fig. 17 – Sistema de dirección
- Fig. 18 – Chasis
- Fig. 19 – Motor bóxer BMW
- Fig. 20 – Basculante standard
- Fig. 21 – Transmisión por cardan
- Fig. 22 – Tubo de escape
- Fig. 23 – Ángulo de dirección requerido [1]
- Fig. 24 – Ángulo de la rueda trasera [1]
- Fig. 25 – Avance en el suelo y avance real [1]
- Fig. 26 – Representación de una motocicleta como dos planos que intersecan [1]
- Fig. 27 – Diferencias entre tamaños de ruedas [1]
- Fig. 28 – Influencia del equilibrio en el comportamiento [1]
- Fig. 29 – Influencia del ángulo de inclinación [1]
- Fig. 30 – Influencia de los movimientos angulares [1]
- Fig. 31 – Influencia de la inclinación [1]
- Fig. 32 – Chasis de tipo diamante
- Fig. 33 – Chasis de la Cotton [1]
- Fig. 34 – Chasis Francis-Barnett y chasis Scott [1]
- Fig. 35 – Chasis de los hermanos McCandless [1]
- Fig. 36 – Ciclomotor NSU Quickly
- Fig. 37 – Primer chasis construido por Tony Foale [1]

- Fig. 38 – Motocicleta Ner-a-car
- Fig. 39 – Chasis de cuna simple cerrado
- Fig. 40 – Chasis de cuna simple abierto
- Fig. 41 – Chasis de cuna simple desdoblado
- Fig. 42 – Chasis de doble cuna
- Fig. 43 – Chasis multitubular
- Fig. 44 – Chasis de doble viga perimetral
- Fig. 45 – Chasis de doble viga perimetral cerrado
- Fig. 46 – Chasis monocasco
- Fig. 47 – Chasis monoviga
- Fig. 48 – Chasis tipo omega
- Fig. 49 – Chasis de la Vincent-HRD [1]
- Fig. 50 – Montesa Enduro 250 K con chasis de simple cuna cerrado
- Fig. 51 – Chasis de doble viga desdoblado en la parte inferior
- Fig. 52 – Prototipo de motocicleta con rasgos futuristas
- Fig. 53 – Pantalla standard de SolidWorks
- Fig. 54 – Barra de herramientas de SolidWorks
- Fig. 55 – Command Manager de SolidWorks
- Fig. 56 – Elasticidad tridimensional
- Fig. 57 – Relación fuerza-desplazamiento en régimen elástico
- Fig. 58 – Tipos de elementos FEM
- Fig. 59 – Elementos tetraedrales FEM
- Fig. 60 - Chasis original de la Honda Crf 2016
- Fig. 61 – Medidas originales de la Honda Crf 2016
- Fig. 62 – Problemas estructurales de un chasis [1]
- Fig. 63 – Desplazamiento lateral en la rueda trasera [1]
- Fig. 64 – Estructuras simples para la explicación de la triangulación [1]
- Fig. 65 – Estructuras articuladas sometidas a una fuerza [1]
- Fig. 66 – Curva tensión-deformación de un material
- Fig. 67 – Cuadro de propiedades del material seleccionado proporcionado por SolidWorks
- Fig. 68 – Dibujo de la línea central del chasis nuevo sobre el bastidor original
- Fig. 69 – Primer diseño de la espina central
- Fig. 70 – Diseño de los anclajes posteriores visto de frente
- Fig. 71 – Diseño de los anclajes posteriores visto lateralmente
- Fig. 72 – Diseño de los anclajes interiores, taladros y refuerzo visto de frente
- Fig. 73 – Diseño de los anclajes interiores, taladros y refuerzo visto lateralmente
- Fig. 74 – Diseño de la base del subchasis visto de frente
- Fig. 75 – Diseño de la base del subchasis visto lateralmente
- Fig. 76– Diseño del subchasis redondeado visto desde delante



- Fig. 77 – Diseño del subchasis redondeado visto desde atrás
- Fig. 78 – Vaciado de la espina central del chasis
- Fig. 79 – Vaciado del chasis
- Fig. 80 – Chasis redondeado visto lateralmente
- Fig. 81 – Chasis redondeado visto desde atrás
- Fig. 82 – Chasis redondeado visto desde delante
- Fig. 83 – Chasis ensamble 1 visto de frente
- Fig. 84 – Chasis ensamble 1 vista lateral 1
- Fig. 85 – Chasis ensamble 1 vista lateral 2
- Fig. 86 – Chasis ensamble 1 visto desde atrás
- Fig. 87 – Chasis ensamble 1 visto desde abajo
- Fig. 88 – Chasis modificado visto lateralmente
- Fig. 89 – Chasis modificado visto desde atrás
- Fig. 90 – Chasis ensamble modificado vista 1
- Fig. 91 – Chasis ensamble modificado vista 2
- Fig. 92 – Chasis ensamble modificado vista 3
- Fig. 93 – Chasis ensamble modificado vista 4
- Fig. 94 – Chasis final visto de frente
- Fig. 95 – Chasis final visto lateralmente
- Fig. 96 – Chasis final visto desde atrás
- Fig. 97 – Chasis final vista del interior
- Fig. 98 – Propiedades chasis final
- Fig. 99 – Subchasis final vista del interior 1
- Fig. 100 – Subchasis final vista del interior 2
- Fig. 101 – Propiedades del subchasis final
- Fig. 102 – Chasis final ensamblado vista lateral 1
- Fig. 103 – Chasis final ensamblado vista lateral 2
- Fig. 104 – Propiedades chasis final ensamblado
- Fig. 105 – Protector de cadena vista lateral exterior
- Fig. 106 – Protector de cadena vista desde de la planta
- Fig. 107 – Protector de cadena vista lateral interior
- Fig. 108 – Protector de cadena montado vista 1
- Fig. 109 – Protector de cadena montado vista 2
- Fig. 110 – Protector de cadena montado vista 3
- Fig. 111 – Mallado standard del chasis vista 1
- Fig. 112 – Mallado standard del chasis vista 2
- Fig. 113 – Mallado standard del chasis vista 3
- Fig. 114 – Mallado basado en curvatura del chasis vista 1
- Fig. 115 – Mallado basado en curvatura del chasis vista 2

- Fig. 116 – Mallado del chasis basado en curvatura con control de malla en los anclajes del amortiguador.
- Fig. 117 – Imposición de restricciones generales vista de frente
- Fig. 118 – Imposición de restricciones generales vista lateralmente
- Fig. 119 – Esquema de la colocación de esfuerzos en frenada máxima
- Fig. 120 – Chasis previo a la simulación en el caso de frenada máxima
- Fig. 121 – Tensiones en el chasis estudio de frenada máxima vista 1
- Fig. 122 – Tensiones en el chasis estudio de frenada máxima vista 2
- Fig. 123 – Tensión máxima en el chasis estudio de frenada máxima
- Fig. 124 – Deformación en el chasis estudio de frenada máxima vista 1
- Fig. 125 – Deformación en el chasis estudio de frenada máxima vista 2
- Fig. 126 – Desplazamiento en el chasis estudio de frenada máxima vista 1
- Fig. 127 – Desplazamiento en el chasis estudio de frenada máxima vista 2
- Fig. 128 – FDS en el chasis estudio de frenada máxima
- Fig. 129 – Esquema de la colocación de esfuerzos en aceleración máxima
- Fig. 130 – Chasis previo a la simulación en el caso de aceleración máxima
- Fig. 131 – Tensiones en el chasis estudio de aceleración máxima vista 1
- Fig. 132 – Tensiones en el chasis estudio de aceleración máxima vista 2
- Fig. 133 – Tensión máxima en el chasis estudio de aceleración máxima
- Fig. 134 – Deformación en el chasis estudio de aceleración máxima vista 1
- Fig. 135 – Deformación en el chasis estudio de aceleración máxima vista 2
- Fig. 136 – Desplazamiento en el chasis estudio de aceleración máxima vista 1
- Fig. 137 – Desplazamiento en el chasis estudio de aceleración máxima vista 2
- Fig. 138 – FDS en el chasis estudio de aceleración máxima
- Fig. 139 – Esquema de la colocación de esfuerzos en paso por curva
- Fig. 140 – Chasis previo a la simulación en el caso de paso por curva
- Fig. 141 – Tensiones en el chasis estudio de paso por curva vista 1
- Fig. 142 – Tensiones en el chasis estudio de paso por curva vista 2
- Fig. 143 – Tensión máxima en el chasis estudio de paso por curva
- Fig. 144 – Deformación en el chasis estudio de paso por curva vista 1
- Fig. 145 – Deformación en el chasis estudio de paso por curva vista 2
- Fig. 146 – Desplazamiento en el chasis estudio de paso por curva vista 1
- Fig. 147 – Desplazamiento en el chasis estudio de paso por curva vista 2
- Fig. 148 – FDS en el chasis estudio de paso por curva
- Fig. 149 – Esquema de la colocación de esfuerzos en salto delantero
- Fig. 150 – Chasis previo a la simulación en el caso de salto delantero
- Fig. 151 – Tensiones en el chasis estudio de salto delantero vista 1
- Fig. 152 – Tensiones en el chasis estudio de salto delantero vista 2
- Fig. 153 – Tensión máxima en el chasis estudio de salto delantero
- Fig. 154 – Deformación en el chasis estudio de salto delantero vista 1

- Fig. 155 – Deformación en el chasis estudio de salto delantero vista 2
- Fig. 156 – Desplazamiento en el chasis estudio de salto delantero vista 1
- Fig. 157 – Desplazamiento en el chasis estudio de salto delantero vista 2
- Fig. 158 – FDS en el chasis estudio de salto delantero
- Fig. 159 – Esquema de la colocación de esfuerzos en salto trasero
- Fig. 160 – Chasis previo a la simulación en el caso de salto trasero
- Fig. 161 – Tensiones en el chasis estudio de salto trasero vista 1
- Fig. 162 – Tensiones en el chasis estudio de salto trasero vista 2
- Fig. 163 – Tensión máxima en el chasis estudio de salto trasero
- Fig. 164 – Deformación en el chasis estudio de salto trasero vista 1
- Fig. 165 – Deformación en el chasis estudio de salto trasero vista 2
- Fig. 166 – Desplazamiento en el chasis estudio de salto trasero vista 1
- Fig. 167 – Desplazamiento en el chasis estudio de salto trasero vista 2
- Fig. 168 – FDS en el chasis estudio de salto trasero
- Fig. 169 – Curva S-N del Aluminio 7075 T6
- Fig. 170 – Estudio de fatiga en el caso de frenada máxima
- Fig. 171 – Estudio de fatiga en el caso de aceleración máxima
- Fig. 172 – Estudio de fatiga en el caso de paso por curva
- Fig. 173 – Estudio de fatiga en el caso de salto delantera vista 1
- Fig. 174 – Estudio de fatiga en el caso de salto delantera vista 2
- Fig. 175 – Estudio de fatiga en el caso de salto trasera
- Fig. 176 – Daño total del chasis

---

Índice de tablas

- Tabla 1 – Propiedades típicos de algunos materiales [1]

## Resumen

El presente proyecto tiene por finalidad el diseño de un chasis monoviga para una motocicleta de off-road. Se trata de un trabajo innovador ya que nunca se ha llevado a cabo el diseño de un chasis monoviga para este tipo de motos, esto es debido a que para su correcto comportamiento fuera de asfalto necesita tener una estructura muy robusta.

Se va a realizar el chasis para un modelo concreto con mucho potencial que acaba de salir este año recién actualizado, la honda crf 250 versión 2016. Se ha diseñado el bastidor para que pueda encajar a la perfección con el resto de componentes de la motocicleta y no haya que modificar ninguna pieza, aunque sí añadir una. Se trata de un primer prototipo por lo que la fabricación del chasis no se contempla.

Lo primero que se hizo fue diseñar el chasis y una vez que se consiguió un buen diseño se probó su fiabilidad en los casos de su uso extremo con el método de elementos finitos. Una vez terminado el proceso correctamente se obtiene un chasis optimizado que presenta la gran ventaja de ser resistente a cualquier esfuerzo dentro del marco de un uso normal combinado con un buen comportamiento estático y dinámico y una buena vida a fatiga.



**Figura 1.** Honda CRF 250 modelo 2016

# I. Conocimiento de la motocicleta.

## 1. Introducción a la motocicleta

La motocicleta es un vehículo que consta de dos ruedas situadas en línea y de un motor que hace traccionar a la rueda trasera para así impulsar el vehículo. El chasis o bastidor es la estructura principal de estos vehículos. La rueda delantera toma un importante protagonismo ya que es la rueda directriz. Las motocicletas pueden ser monoplaça o biplaça, dependiendo del uso para el que sean destinadas.

La motocicleta hoy en día se podría considerar como un medio de transporte, un deporte, una diversión o incluso una forma de vida para ciertas personas. El papel fundamental que juega la motocicleta en nuestra sociedad es el de medio de transporte, ya que es un medio rápido y económico aunque conlleva el riesgo de que en caso de accidente generalmente es más peligroso que los medios más usados como vehículos de 4 ruedas.

Hay muchos tipos de motocicletas en función del gusto del piloto y del uso que se le vaya a dar. Los tipos más comunes son:

- **Deportivas:** Muy usadas a la hora de realizar carreras de velocidad en circuito o por apasionados de las dos ruedas para su uso ocasional. Suelen montar carenado que mejora sus cualidades aerodinámicas para poder alcanzar altas velocidades. Gozan de gran estabilidad direccional y tienen una alta relación entre potencia y peso.
- **Naked:** Son motos normalmente de gran cilindrada, con unas características muy similares a las deportivas pero con un cambio importante, que es la ausencia de carenado. Al carecer de este elemento pierden mucha aerodinámica, lo que no permite alcanzar velocidades tan altas como en las deportivas aunque lleven instalado un motor similar.

Dentro de las naked también hay un pequeño segmento que son motos utilitarias con motores de poca cilindrada que destacan por ser motos utilitarias, fiables y económicas.

- **Turismo:** Son motos destinadas generalmente a la realización de viajes largos por carretera. Suelen ser vehículos muy pesados con mucha potencia que gozan de gran estabilidad y seguridad en carretera. Se trata de motos cómodas que disponen de varias maletas portaequipajes.
- **Custom:** También son conocidas como chopper, son identificadas por muchas personas con una marca muy común de este tipo de motos, las Harley Davidson. Son motos de elevado precio que cumplen una función fundamentalmente estética. Una característica que solo tienen estas motos es el ruido tan particular que producen sus tubos de escape, los cuales captan la atención de todo el que está a su alrededor.
- **Scooter:** Son motos que fueron creadas para uso urbano aunque se han desarrollado posteriormente modelos para uso interurbano. Tienen la ventaja de ser automáticas, lo que las convierte en motos cómodas y de fácil manejo. Además estas motos suelen tener un compartimento debajo del asiento para poder guardar el casco o poder transportar objetos de pequeñas dimensiones.
- **Off-road:** Son las conocidas coloquialmente como motos de campo, en esta categoría se podrían incluir las motos de cross, de enduro y de trial. En principio las motos de cross están diseñadas para rodar por circuitos de cross, las motos de enduro para circuito de cross o para campo abierto, y las de trial para realizar saltos de obstáculos tanto en un circuito como en campo.
- **Supermotard:** Son motos de cross o de enduro que guardan la estructura principal de la moto pero incorporan ciertas modificaciones para hacerlas más aptas para circular por asfalto. El uso que se les da es tanto para circuito de velocidad como para circular por la vía pública.
- **Ciclomotores:** Son motos que pueden tomar cualquiera de los otros formatos de motocicleta pero con la particularidad de que el motor no puede tener más de 50 centímetros cúbicos (cc) ni proporcionar más de 8,5 caballos de vapor (cv). Al tener esta limitación de potencia están pensadas para que se puedan conducir a partir de los 14 años tras haber obtenido una licencia de conducción de ciclomotores.

En el caso del proyecto que se está tratando, las motocicletas de interés para el mismo son las de tipo off-road, y más concretamente las cross, ya que el chasis que se va llevar a cabo va a ser el esqueleto de una moto de esta tipología.

## 2. Historia de la motocicleta

La historia de la bicicleta y de la motocicleta se encuentran estrechamente ligadas, esto es debido a que la motocicleta partió en su origen de una bicicleta evolucionando hasta como la conocemos hoy en día.

La primera moto de la que hay constancia data de 1867, año en el que el estadounidense Sylvester Howard Roper fabricó un motor de dos tiempos de vapor, el cual utilizaba carbón como combustible. Howard Roper implantó el motor en el cuadro de una bicicleta inventando así la primera motocicleta.



**Figura 2.** Primera motocicleta de Howard Roper

Posteriormente en 1885 los alemanes Wilhelm Maybach y Gottlieb Daimler construyeron una motocicleta cuyos elementos estructurales más importantes, es decir las ruedas y el bastidor, estaban contruidos en madera y que instalaba como propulsor un motor de combustión interna.





**Figura 3.** Motocicleta de Maybach y Daimler

El motor de combustión interna que montaron Maybach y Daimler no era inventado por ellos, si no por el famoso ingeniero alemán Nikolaus August Otto, que lo llamo “motor de ciclo Otto”. Este conocido motor de combustión interna era de cuatro tiempos y transmitía una potencia de 0,5 cv consiguiendo que la motocicleta alcanzara una velocidad de 18 km/h.

En 1884 también en Alemania Hidelbrand y Wolfmüller presentaron una moto de fabricación en serie con fines comerciales concretos. Este primer modelo de fabricación en serie se estuvo fabricando durante varios años. Se encontró con el inconveniente de que las motocicletas todavía no gozaban de gran acogida entre la sociedad de la época.



**Figura 4.** Motocicleta de Hidelbrand y Wolfmüller

En el año 1897 los hermanos Werner de origen ruso y profesión periodistas, optaron por montar un pequeño motor en una bicicleta. Primeramente montaron el motor encima de la rueda trasera, posteriormente lo montaron sobre la rueda delantera dándole la tracción a dicha rueda y finalmente un año más tarde realizaron el diseño definitivo situando el motor en el eje del pedalier, transmitiendo de esta manera la potencia mediante una correa a la rueda trasera. Este modelo final lo comercializaron con gran éxito con el nombre de “motocicleta” y a partir de ahí fue cuando se empezó a denominar motocicleta a este vehículo.



**Figura 5.** Motocicleta de los hermanos Werner

Fue a partir del invento de estos hermanos cuando la sociedad empezó a interesarse por el uso de las motocicletas.

En 1902 fue inventada en Francia el scooter o ciclomotor por Georges Gauthier, a este invento también se lo conoció como el auto sillón. Se trata de una motocicleta pequeña, sostenida sobre dos ruedas pequeñas, con un salpicadero de protección y un cuadro abierto que permite al conductor estar en posición sentada.



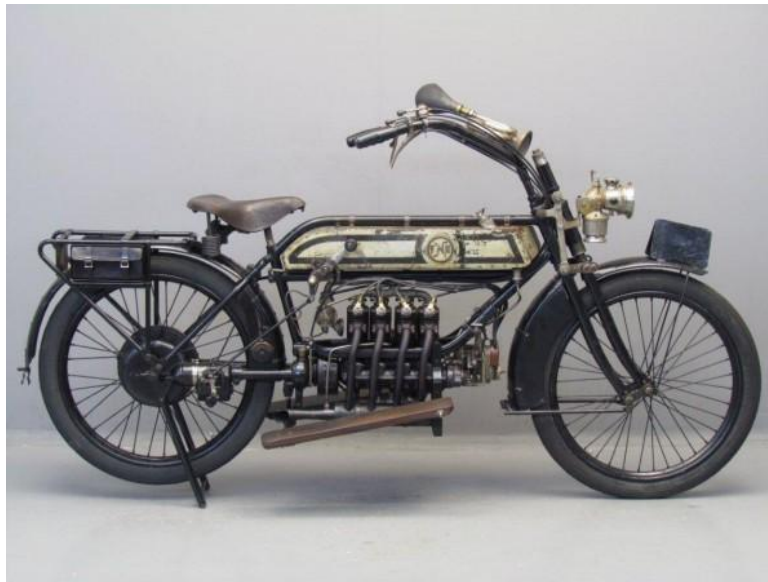
**Figura 6.** Scooter de George Gauthier

Se fabricó el scooter en 1914 y se hizo muy popular entre los jóvenes al poco tiempo. Alcanzó una gran popularidad, ya que era un vehículo urbano que también servía para realizar viajes largos. Destacó por su comodidad en el manejo y su facilidad de conducción.

Durante esta aparición del scooter se fue desarrollando por otros cauces un concepto que se presentó en 1910, este invento fue el sidecar. El sidecar consistía en un compartimento con forma de carrito que se une al lateral de la motocicleta y está soportado únicamente por una rueda lateral. Este compartimento o habitáculo que va unido rígidamente a la motocicleta solía tener la función de llevar un pasajero en su interior.

A partir del siglo XX se empezaron a diseñar motocicletas con motores diferentes de los que había hasta ese momento. Comenzaron a aparecer motores con más de un cilindro, apareciendo así modelos de motocicletas que estaban impulsadas por motores bicilíndricos o incluso tetracilíndricos.

En 1905 fue lanzada al mercado por la empresa belga FN el modelo FN Four que contaba con un motor de cuatro cilindros. Desde sus inicios se caracterizó por su gran fiabilidad y sofisticación aunque no gozaba de gran velocidad. Este modelo destacaba por tener un chasis ligero y eficiente y por su transmisión secundaria por cardán. Este modelo fue un gran éxito de ventas desde sus inicios, se fabricó durante más de 20 años sacando diversas variantes del modelo con diferentes cilindradas.



**Figura 7. Motocicleta FN Four**

A partir de 1920 se empezaron a diseñar motos con mayor grado de sofisticación y que poseían la capacidad de alcanzar cada vez mayor velocidad. Fue a partir de ese momento en el cuál las motocicletas con motores bicilíndricos marcaron el inicio de los motores de gran cilindrada.

En el periodo anterior a la Segunda Guerra Mundial Triumph presentó su innovador modelo Speed Twin que se impulsaba con un motor bicilíndrico de 500 cc. Este modelo gozó de una gran acogida entre la población debido a su innovación y a su deslumbrante estética.



**Figura 8.** Motocicleta Triumph Speed Twin

Durante la década de 1940 y 1950 máquinas como la Triumph Speed Twin o la Brough Superior diseñadas por los ingleses mantuvieron dominado el mercado.

Durante este periodo en el que triunfaban las motocicletas bicilíndricas, las motocicletas monocilíndricas estaban en segundo plano pero seguían teniendo demanda. Esto era gracias a sus modelos deportivos, como la Gilera Saturno o la Gold Star BSA. Estos modelos destacaban por su estilo y su alto rendimiento, consiguiendo cubrir las expectativas del público más exigente que quería disfrutar de una conducción más divertida y agresiva.



**Figura 9.** Motocicleta Gilera Saturno



En el transcurso de esta época marcas como Vincent, Harley-Davidson e Indian iniciaban la tendencia de instalar en sus motocicletas un motor en forma de “V” de dos cilindros en sus modelos de grandes cilindradas, estos reportaban grandes ventajas a las motocicletas.

Posteriormente las motocicletas japonesas se introdujeron en el mercado marcando tendencia en la década de 1960. Destacaron con modelos que poseían un diseño extraordinario combinado con un gran rendimiento. Un ejemplo de estos primeros modelos japoneses fue la Honda CB 450 y la Suzuki T500.



**Figura 10.** Motocicleta Honda CB 450

En el año 1969 Honda revolucionó el mundo de las motocicletas con su deslumbrante modelo CB 750. Esta innovadora máquina estaba propulsada por un motor de cuatro cilindros montados en línea, fue la primera superbike. La CB 750 destacaba por su nivel de sofisticación, lo que dejaba demostrado que empezaba la nueva era dejando atrás a los fabricantes ingleses.



**Figura 11.** Motocicleta Honda CB 750

A finales de la década de 1970 las marcas provenientes del país de Japón habían sacado al mercado un gran abanico de modelos de superbikes, algunos modelos contaban con motores de hasta seis cilindros. Ante esta situación de dominio del mercado por los japoneses, los europeos decidieron innovar diseñando nuevos modelos que destacaban por sus diferencias con los modelos japoneses.

A partir de la década de 1980 en adelante, los fabricantes de motocicletas se han dedicado a perfeccionar las motocicletas usando de base los avances que ya tenían con el fin de obtener mayor potencia y mejores prestaciones, sofisticación y confort. Un ejemplo de de lo que se ha conseguido es la Honda Cbr 1000 rr.



***Figura 12.*** Motocicleta Honda CBR 1000 rr

### 3. Elementos de la motocicleta

#### *a) Ruedas*

Las ruedas son un elemento fundamental de la motocicleta, podrían considerarse un elemento estructural. La rueda es el punto contacto entre la moto y el suelo y son las encargadas de transmitir las fuerzas de conducción, frenado y dirección, además de soportar el peso de la motocicleta y del piloto.

Las ruedas toman diferentes medidas y formas en función del uso que se le vaya a dar a la moto. La rueda generalmente engloba el conjunto de llanta y neumático.



**Figura 13.** Rueda de off-road



**Figura 14.** Rueda de carretera

#### *b) Frenos*

Los frenos son un mecanismo imprescindible en cualquier vehículo y aún toman más importancia en el caso de la motocicleta. Tienen la función indispensable de frenar o detener la motocicleta.

Los frenos pueden ser de accionamiento mecánico o hidráulico. Hay dos tipos de frenos: los de zapata y los de disco, y dentro de cada uno de los tipos hay más subtipos. Los frenos de zapata se usaban mayoritariamente en el mundo de las motocicletas antiguas, mientras que en la actualidad casi todos los frenos utilizados son frenos de disco debido a su superioridad general sobre los de zapata.



**Figura 15.** Freno de disco

### *c) Suspensiones*

La suspensión es un elemento muy importante de seguridad que también tiene la misión de proporcionar confort en la conducción. Tiene la función de absorber las irregularidades del terreno sobre el que circula y de determinar la estabilidad del vehículo, en términos generales, determina el comportamiento de toda la motocicleta.

Generalmente la suspensión de una moto suele estar compuesta en la parte delantera por una horquilla formada por dos barras y en la parte trasera por un monoamortiguador. Esa es la configuración general de suspensión que suelen instalar las motos, pero puede variar totalmente en función de como se haya querido diseñar.



**Figura 16.** Conjunto de amortiguación: horquilla telescópica y amortiguador



#### *d) Sistema de dirección*

El sistema de dirección de una motocicleta tiene un papel clave, y aunque en las motocicletas se trata de un mecanismo sencillo y directo, resulta imprescindible para poder girar el vehículo. El sistema de dirección es controlado por el piloto desde el manillar.

En las motocicletas la conducción se realiza mediante la articulación de la rueda delantera, la cual gira según el eje vertical donde se encuentra la barra de la dirección. Con esta articulación se consigue, mediante basculación sobre la componente vertical, trazar la curva requerida por el piloto.



**Figura 17.** Sistema de dirección

#### *e) Chasis*

Al chasis también se le conoce como cuadro, esqueleto o bastidor. Es el elemento estructural más importante de la motocicleta, es la base sobre la cual se monta el motor y sobre la cual van ensamblados el resto de los componentes que forman el conjunto de la motocicleta. Puede adquirir diversas formas o estar fabricado de diferentes materiales en función del uso para el que esté destinada la moto y del aspecto que se le quiera dar a la misma.

El cuadro debe estar diseñado para comportarse como una estructura rígida capaz de soportar grandes esfuerzos sin sufrir alteraciones. El chasis proporciona estabilidad a la moto por lo que debe de estar muy bien compensado y estudiado su diseño.



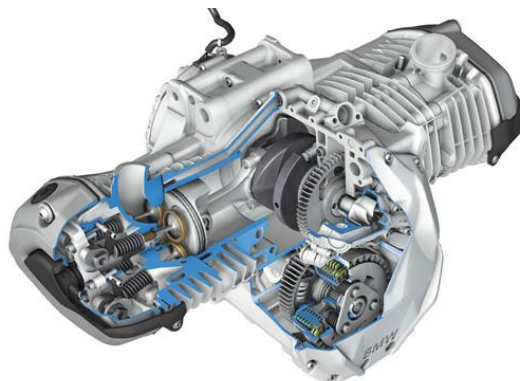
**Figura 18.** Chasis

### *f) Motor*

El motor juega un papel imprescindible en las motocicletas, ya que es el encargado de proporcionarles movimiento a estas. Suelen utilizarse motores de combustión interna de gasolina de dos o cuatro tiempos. [2]

En la actualidad los motores más usados son los de cuatro tiempos, esto se debe a que los motores de dos tiempos necesitan un mayor mantenimiento, son más contaminantes y tienen un mayor consumo, aunque generalmente ofrecen una mayor potencia.

Los motores desde sus inicios comúnmente venían refrigerados por aire, pero de un tiempo atrás hasta la actualidad ha habido una tendencia a utilizar la refrigeración por medio de líquido, ya que se ha observado una mejor refrigeración con su uso.



**Figura 19.** Motor bóxer BMW

### *g) Basculante*

En la actualidad prácticamente la totalidad de las motocicletas tienen montado en su estructura un basculante. Entre las funciones de esta pieza destaca la de hacer de unión entre la rueda trasera y el chasis de la moto, y en ciertas ocasiones también soporta parte de la amortiguación trasera de la moto.

El basculante se une con el chasis mediante un eje común que le permite el giro en el plano perpendicular y le inhibe el resto de movimientos. Hay una gran diversidad de tipos de basculantes en función de la misión a la que vaya destinada la motocicleta o de la estética que se quiera conseguir.

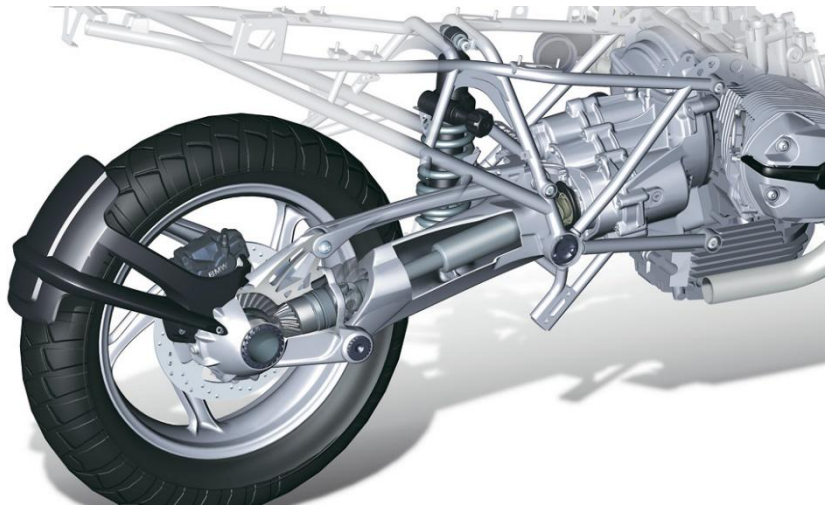


***Figura 20. Basculante standard***

### *h) Transmisión*

La transferencia del par del motor a la rueda trasera se realiza por medio de la transmisión. Las transmisiones más comunes en la actualidad son por cadena, por correa o por cardán.

El sistema más utilizado es la transmisión por cadena, ya que es el sistema más sencillo y económico, aunque también el menos sofisticado y necesita un mantenimiento riguroso para su correcto funcionamiento.



**Figura 21.** Transmisión por cardan

### *i) Escape*

El tubo de escape es una pieza de gran importancia para la propulsión de la moto, ya que tiene la misión de conducir los gases de salida quemados en el motor al exterior enfriándolos para que terminen su expansión. Este consigue que los gases salgan produciendo un menor ruido y una menor presión.

El sistema de escape está formado por unos tubos de conducción y un silenciador. Hay diversos tipos de escapes en función de la estética que se quiera, la potencia deseada y el ruido que se quiera generar



**Figura 22.** Tubo de escape

## 4. Conceptos teóricos

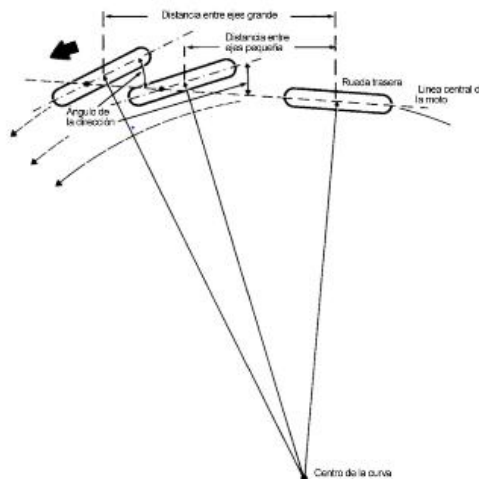
### *a) Distancia entre ejes*

La distancia existente entre los ejes de las ruedas es un factor que influye de manera decisiva en el comportamiento de la motocicleta. En rasgos generales, a mayor distancia mejor será la estabilidad direccional y se necesitará un mayor esfuerzo para tomar las curvas. Existen principalmente tres motivos para que esto suceda [1]:

#### 1) Ángulo de giro requerido

Para una cierta curva será necesario girar más la rueda delantera hacia el interior de la curva con una moto con una distancia entre ejes prominente que con una motocicleta con una distancia entre ejes más pequeña. Como consecuencia de necesitar girar más la rueda delantera es necesario un mayor esfuerzo para poder tomar las curvas.

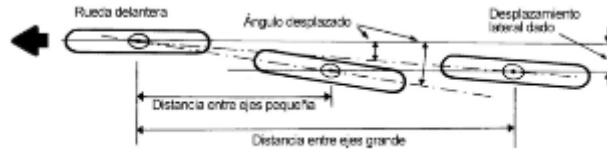
Al tener una distancia de ejes grande, si se tiene una cierta flexión en la rueda delantera tendría un efecto menor en la estabilidad direccional, esta flexión se podría producir principalmente al pasar con la moto sobre un bache.



**Figura 23.** Ángulo de giro requerido [1]

## 2) Ángulo de la rueda trasera

Hay que tener en cuenta que si tenemos una cierta flexión lateral, el ángulo que forma la rueda de atrás con la dirección de viaje es menor con una distancia entre ejes grande. Este fenómeno ayuda a mejorar la estabilidad direccional.



**Figura 24.** Ángulo de la rueda trasera [1]

## 3) Efectos de inercia

La distancia entre ejes afecta inercialmente hablando a la transferencia de peso que se produce durante la frenada y la aceleración. Afecta de manera que en cuanto mayor sea la distancia entre ejes, menor será la transferencia de peso. También cuanto mayor sea esta distancia, los momentos de inercia de los planos de cabeceo y guiñada aumentarán, lo cual conseguirá que la moto sea más estable y más perezosa.

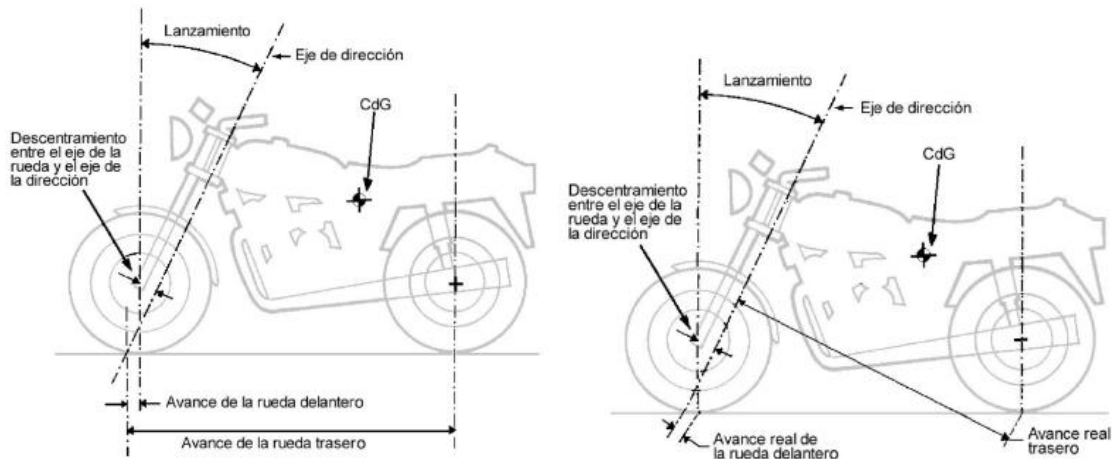
La distancia entre ejes es un concepto que se debe tener claro a la hora de diseñar nuestra moto, ya que varía mucho el comportamiento de esta en función de la distancia que le queramos dar.

### *b) Avance*

El avance tiene como función principal proporcionar a la moto un determinado grado direccional. También se puede considerar un papel fundamental de este en el inicio de la fase de inclinación al trazar una curva [1].

Observando las imágenes ilustrativas anteriores se puede percibir como el neumático delantero y el neumático trasero tienen el punto de contacto con el suelo por la parte trasera donde corta el eje de la dirección con el suelo, esto provoca un efecto de autocentrado en ambas ruedas. La distancia resultante entre el eje de dirección y el centro de la huella de la rueda medida paralela al suelo es el avance en el suelo.

Por otro lado tenemos el avance real o avance mecánico, este se define como la distancia resultante entre la huella de contacto de la rueda y el eje de dirección en ángulo perpendicular con respecto a ese eje. Debido a dicha distancia cualquier fuerza generada en la rueda crea un momento en torno al eje de la dirección.



**Figura 25.** Avance en el suelo y avance real [1]

El avance real comúnmente es el 90% del avance en el suelo para las motocicletas que están diseñadas con un lanzamiento standard, y suele ser equivalente al avance en el suelo para motocicletas con un lanzamiento de cero grados.

Cualquier perturbación en la dirección en la que se dirige la moto, debida al desplazamiento lateral de la huella del neumático, está generada en mucha menor medida por la rueda trasera que por la rueda delantera. Podremos afirmar entonces que aunque el gran lanzamiento de la rueda trasera tenga un efecto autolineante parcialmente pequeño, este queda compensado por el efecto del desplazamiento de la rueda trasera en estabilidad direccional porque también es pequeño.

Otro factor a tener en cuenta por su importancia ya que influye en la estabilidad direccional, son las reacciones giroscópicas. Por otro lado hay que tener en cuenta que la cantidad de avance también influye en la estabilidad direccional.

También cabe destacar en el avance, que este no es un valor fijo para cada motocicleta, ya que hay ciertos factores que hacen que el avance varíe durante la conducción. Los factores más usuales son el radio del perfil del neumático, el ángulo de giro de la dirección y el ángulo de inclinación.

La principal influencia del avance es proporcionar una cierta estabilidad direccional, pero también tiene influencia en otros aspectos como el tacto en línea recta o el efecto direccional.



### *c) Ángulo de lanzamiento*

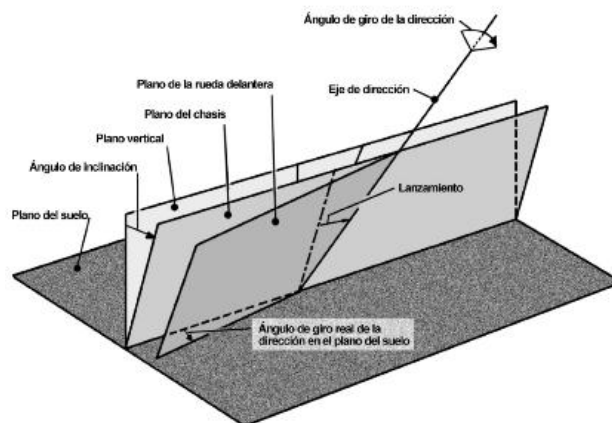
En el ángulo de lanzamiento existen varios factores relevantes para poder comprender el lanzamiento, el factor que cabe destacar entre ellos es la conveniencia que existe desde el punto de vista de la construcción del bastidor. Una motocicleta de construcción normal suele tener la pipa inclinada entre 20 y 30 grados respecto al eje vertical [1].

Durante la historia de las motocicletas se han diseñado modelos de motos con el tren delantero alternativo, como por ejemplo modelos que montaban el eje de dirección en el buje de la rueda delantera. En estos modelos el eje de la rueda no tiene decalaje con respecto al eje de la dirección, es decir, el avance es independiente del ángulo de lanzamiento. En estos modelos el ángulo de lanzamiento es mucho menor de lo normal pero, al contrario de lo que se esperaría, el comportamiento de estas motocicletas ha destacado por su gran estabilidad y buen comportamiento direccional.

Casos aparte, generalmente un lanzamiento diferente de cero grados no suele ofrecer buenos resultados. Los efectos más negativos del lanzamiento se dan en casos con grandes ángulos de giro de la dirección.

En ciertos casos el efecto autolineante debido al peso puede ser beneficioso mientras que en otros casos puede resultar perjudicial. A la hora de trazar una curva es necesario una velocidad determinada y un ángulo de inclinación concreto, si tenemos exceso o defecto de ellos el piloto podrá contrarrestarlos aplicando un determinado esfuerzo para conseguir los valores correctos.

El ángulo de giro de la dirección que se necesita para un ángulo de inclinación concreto es función de múltiples parámetros, entonces es imposible diseñar un efecto autolineante que haga que la moto se comporte de manera adecuada en cualquier situación. Con esto se llega a la conclusión de que la solución reside en la necesidad de llegar a un compromiso entre todos los factores.



**Figura 26.** Representación de la moto como dos planos que se intersecan [1]



### *d) Otras consideraciones*

#### ○ **Diámetros de las ruedas**

En cuanto al tamaño ideal de las ruedas no hay un consenso sobre cuál es la medida idónea, tanto para la medida llanta como para la altura del neumático.

El comportamiento de la moto en función del neumático se ve afectado por la altura y el tamaño de este. La altura del neumático influye de manera que cuanto más alto es el neumático más vibraciones repercutirán en la moto. El tamaño del neumático requiere llegar a un compromiso para conseguir el tamaño adecuado para el uso requerido [1].

A continuación se exponen las ventajas y desventajas derivadas del uso de diferentes tamaños de neumáticos:

- Estructuralmente las ruedas de pequeñas dimensiones son más rígidas.
- Una rueda de pequeñas dimensiones se introduce de forma más fácil en los agujeros o baches, y percibe los baches profundos más notablemente.
- El efecto autolineante del avance y el lanzamiento se acentúa a la hora de usar ruedas de pequeñas dimensiones.
- Las fuerzas giroscópicas estarán siempre influenciadas por la dimensión de la rueda. Una rueda de mayores dimensiones comenzará a generar fuerzas de precesión a velocidades inferiores.
- Para una cierta sección de neumático, una rueda de menor dimensión disminuye la masa no suspendida, lo que repercute positivamente en el agarre al suelo, y en la inercia de la dirección.
- Para una cierta sección de neumático, la superficie en contacto con el suelo es mayor en las ruedas de mayor dimensión. Con ruedas de menor dimensión se puede modificar el neumático aumentando su anchura para así tener un área de contacto similar, esta solución no es un buen recurso debido a que puede traer consigo otros problemas.

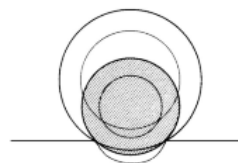


Fig. 3.22 Una rueda pequeña se mete más fácilmente en los agujeros que una grande.

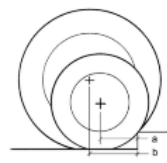


Fig. 3.23 La rueda pequeña se mueve una distancia mas pequeña "a" para subir el escalón, comparada con la rueda grande que tiene que recorrer la distancia "b".

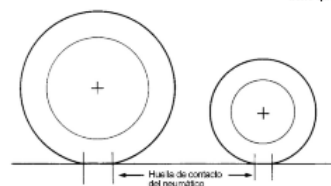


Fig. 3.24 Los neumáticos de mayor diámetro generalmente tienen una huella de contacto mayor. La forma y el tamaño exactos del área de contacto dependerán también de la anchura, la presión de hinchado y otras propiedades del neumático.

**Figura 27. Diferencias entre tamaños de rueda [1]**

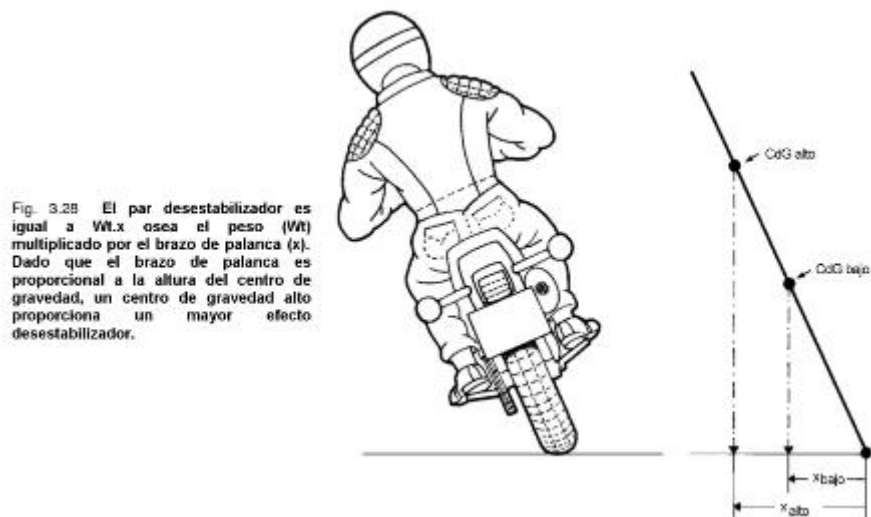
## ○ Posición del peso

En términos generales se puede afirmar que, cuanto menos pesada sea la moto mucho mejor. Un factor muy importante a tener en cuenta a la hora de diseñar una motocicleta es la masa que esta tenga y su distribución. La ubicación del centro de gravedad del conjunto de la motocicleta es decisiva en su comportamiento [1].

Hay que tener en cuenta una serie de factores al respecto:

### Equilibrio

Un peso contenido y centro de gravedad bajo ayudan a tener un buen equilibrio.



**Figura 28.** Influencia del equilibrio en el comportamiento [1]

### Transferencia de carga

Durante el proceso de frenada, se transfiere la carga vertical existente desde la rueda de atrás hacia la de delante. Durante el proceso de aceleración la transferencia de carga es en sentido opuesto.

La disminución de la transferencia de carga se consigue aumentando la distancia entre ejes, bajando la posición del centro de gravedad o reduciendo la masa. La posición longitudinal del centro de gravedad no afecta a la transferencia de carga pero si afecta a la carga estática que controla cada rueda.

## Tracción

La distribución de cargas que proporciona una cantidad considerable de peso en la parte trasera mejora la tracción de la motocicleta. Esto es debido a que la fuerza propulsora que la rueda trasera puede proporcionar al suelo es proporcional a la carga que soporta dicha rueda.

A la hora de hacer el reparto de pesos hay que tener en cuenta la necesidad de que la rueda delantera mantenga el contacto con el suelo para poder girar. Una distribución de carga que sitúe mayor peso en el tren delantero ayuda a conseguir una mejor estabilidad direccional.

## Ángulo de inclinación

La altura del centro de gravedad afecta en parte al ángulo de inclinación que se necesita para equilibrar la fuerza centrífuga cuando trazamos una curva.

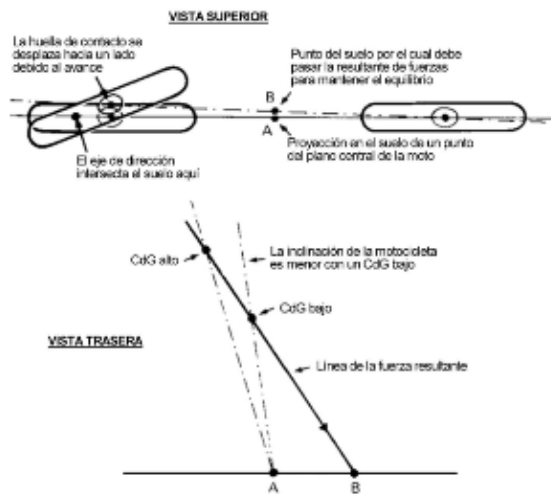
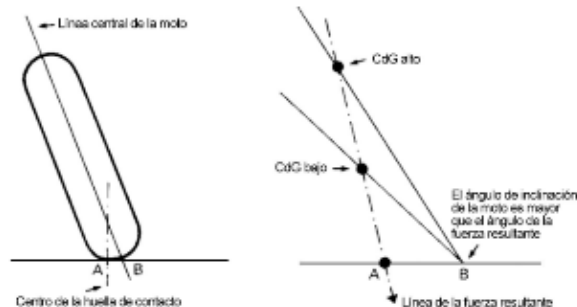


Fig. 3.29 Aunque un centro de gravedad bajo requiere un menor grado de inclinación, el efecto es menor la práctica al verse contrarrestado por un efecto opuesto debido a la anchura de los neumáticos.

(Ver más abajo)

Fig. 3.30 Podemos ver diferentes ángulos de inclinación requeridos con distintas alturas del centro de gravedad, debido a la anchura del neumático. Este efecto es opuesto al mostrado arriba.



**Figura 29. Influencia del ángulo de inclinación [1]**

## Movimientos angulares

En los movimientos angulares que se pueden originar es importante la distribución de la masa, ya que es la que domina lo que se denomina los momentos de inercia. Estas son una medida del efecto de inercia alrededor de cada eje específicamente y su valor es determinable de manera rápida ya que podemos aplicar una aceleración angular a la motocicleta alrededor de dicho eje.

Los movimientos angulares que se pueden producir son:

- Cabeceo: Alrededor de un eje transversal
- Guiñada: Alrededor de un eje vertical
- Inclinación: Alrededor de un eje longitudinal

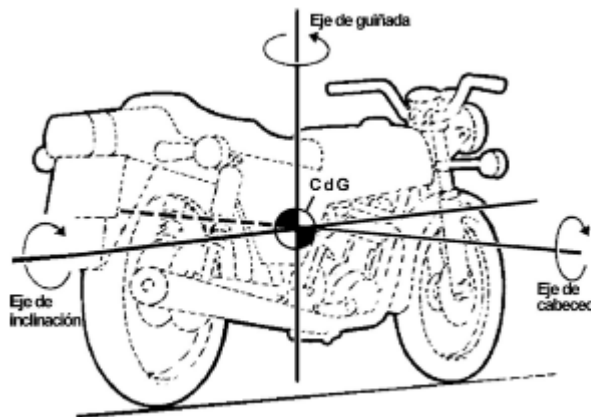


Fig 3.31 Los tres ejes principales alrededor de los cuales una moto puede rotar. El dibujo sólo muestra la dirección de estos ejes, dibujados a través del centro de gravedad. Su ubicación real depende de muchos factores dinámicos que se muestran en otros capítulos.

**Figura 30.** Influencia de los movimientos angulares [1]

### - Cabeceo

La inercia del cabeceo controla la velocidad con que la motocicleta se hunde hacia adelante o hacia atrás ante diversas situaciones como puede ser frenar, acelerar o circular por un firme bacheado.

En motocicletas de trial o motocross es necesaria una rápida respuesta de giro alrededor del eje.

Es complicado definir el eje alrededor del que la motocicleta cabecearía ya que varía en función del diseño de la moto. En el caso de una motocicleta normal con amortiguación en ambos trenes, el eje de cabeceo dependería de la geometría de la suspensión y de la dureza de esta. El cabeceo es el único movimiento angular que es primordialmente un movimiento de la masa suspendida respecto a las ruedas.

- Guiñada

Todos los vehículos existentes están vinculados a cierto grado de aceleración de guiñada al trazar una curva. En el caso de las motocicletas la decisión entre un momento de inercia de pequeña magnitud o de gran magnitud tiene efectos contrapuestos.

En la práctica es mejor conseguir un bajo momento de guiñada, esto trae consigo concentrar la masa de la motocicleta lo más cerca posible del centro longitudinal de la motocicleta. Y en consecuencia se disminuye el cabeceo adicionalmente.

- Inclinación

La resultante de sumar las componentes de todas las masas multiplicadas por el cuadrado de la longitud que las separa de un eje de inclinación que pase por el centro de gravedad es el momento de inercia que resulta en torno al eje de inclinación.

Para conseguir, sin apenas esfuerzo, cambios rápidos en la inclinación de la moto es necesario tener un bajo momento de inercia en torno al eje de inclinación.

En una motocicleta el momento de inclinación generado por la fuerza centrífuga está completamente igualado con el momento de inclinación contrario generado por la acción de la fuerza de gravedad que se crea al darle inclinación a la motocicleta. Únicamente durante el proceso transitorio de inclinación aparece un momento de inclinación que no está equilibrado.

La opción más deseable sería diseñar un eje de inclinación concreto para motocicletas, pero el eje de inclinación tiene la posibilidad de estar donde se quiera, todo depende de donde situemos el punto de referencia. Cada punto de vista escogido tiene su propio eje de inclinación diferente.

Observando la moto desde atrás desde un punto fijo en la tierra, justo en el momento en el que la moto se encuentra en medio de la fase de inclinación, en dicho momento la moto se encontrará moviéndose lateralmente encaminándose hacia el centro de la curva aunque adicionalmente tendrá un movimiento de rotación.

Los dos movimientos anteriores actuando juntos producen un movimiento combinado en el centro de gravedad. Por lo tanto el centro de rotación de este gran arco está situado en cierto lugar por debajo del suelo.

Ya que las componentes relativas de los movimientos longitudinal y lateral cambian durante el proceso de entrada a la curva, variará de posición, en consecuencia, el eje de inclinación que se ha definido de esta manera.

Otra forma de verlo sería viéndolo desde el suelo, entonces todos los puntos de la motocicleta tendrían una composición de movimiento lateral y de rotación, salvo el centro del perfil del neumático. Este tendría solamente movimiento lateral y el resto de los puntos estarían rotando alrededor de él. Si lo cogemos de esta manera necesitaríamos un eje de inclinación técnico.



Fig 3.35 Al añadir los dos movimientos se produce un movimiento combinado con un radio más grande.

**Figura 31.** Influencia de la inclinación [1]

## 5. Conocimiento del chasis

### *a) Evolución temporal*

#### - Chasis Tubulares

Durante todo el recorrido de la historia se observa como los diseñadores han sido asiduamente criticados por su insistencia en usar como modelo básico para sus construcciones una estructura con forma de diamante, originario del chasis de bicicleta. Este modelo de partida tiene su lógica, ya que los primeros modelos de motocicleta que se diseñaron consistían en una bicicleta a la cual se le había incorporado un motor. Estos modelos seguían llevando pedales como elemento auxiliar.

Hasta el momento en el cuál se empezó a usar la suspensión trasera de forma más generalizada la mayor parte de los chasis usados tenían como base la forma de diamante. Desde un punto de vista práctico, el uso de estos diseños era lógico ya que eran chasis altos, que era un factor muy positivo a la hora de albergar los altos motores monocilíndricos de la época, y también debido a que estos bastidores proporcionaban, gracias a la inclinación de la pipa, un buen avance a la rueda delantera, lo que repercutía positivamente haciendo que la moto fuera muy estable en trayectorias rectas.



**Figura 32.** Chasis de tipo diamante

Cuando se descartó el uso de pedales en las motocicletas se continuó usando como partida el chasis tipo diamante, situando el cárter del motor donde se encontraba el eje del pedalier.

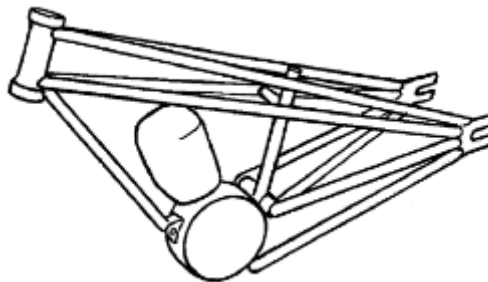
Este chasis tuvo éxito durante muchos años, anteriores y posteriores a la primera guerra mundial. Pronto se diseñó una variante de este chasis, fue el bastidor tipo single-loop, en el cual el tubo frontal y el del sillín eran sustituidos por un sólo tubo doblado que seguía pasando por debajo del motor.

Estos bastidores fueron perfeccionados con el diseño del chasis de simple cuna. En este modelo nuevo los extremos inferiores del tubo frontal y el tubo del sillín se encontraban separados y en conexión rígida por la cuna que abrazaba al motor. Los tubos que se encontraban realizando la forma de cuna se alargaban hasta llegar a las orejeras donde se situaba el eje de la rueda trasera[1].

El siguiente bastidor diseñado para perfeccionar la técnica fue el chasis de doble cuna. Este se diferenciaba del de simple cuna en que los tubos de la cuna continuaban hasta arriba llegando a la pipa de la dirección.

Hasta el momento la rigidez a torsión y la rigidez a flexión no había sido un caso que se estuviera estudiando generalmente, fue en el periodo de entreguerras cuando se comenzó a darle importancia a estos conceptos y se empezó a tener en cuenta a la hora de diseñar los bastidores y las motocicletas.

Primeramente se intentó mejorar este aspecto triangulando la estructura. Un buen ejemplo de esto es la motocicleta Cotton, que fue éxito en la época por su excelente estabilidad.



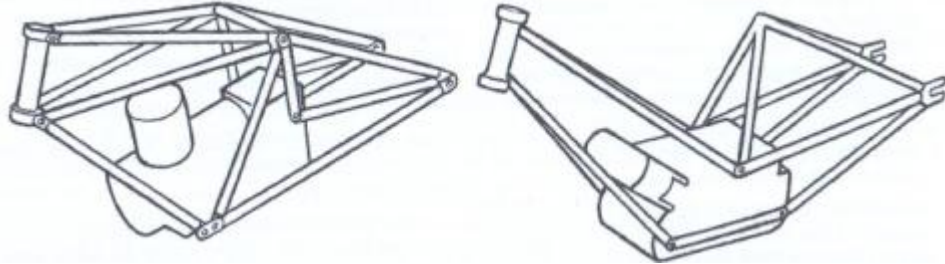
***Figura 33. Chasis de la Cotton [1]***

Seguidamente a la Cotton se llevaron a cabo ciertos experimentos que intentaban lograr darle una mayor rigidez al soporte del cabezal de la dirección. Esto se realizó introduciendo una pieza con forma de H que sustituía el tubo frontal que bajaba hacia abajo en la Greeves y el tubo superior en algunas BSA.

El bastidor de la Francis-Barnett estaba totalmente triangulado excepto en la parte de atrás en sentido horizontal, y usaba el motor como elemento estructural.



La motocicleta Scott disponía también de un bastidor con el motor autoportante y la parte trasera totalmente triangulada pero la pipa de la dirección no estaba triangulada verticalmente.

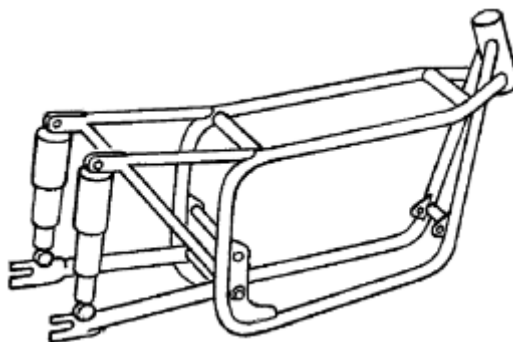


**Figura 34.** Chasis Francis-Barnett y chasis Scott [1]

Posteriormente con la aparición de los sistemas de suspensión trasera, gran parte de los fabricantes hicieron una modificación muy básica consistente en abrir la parte trasera del chasis de cuna para poder albergar los amortiguadores. Al realizar solamente esta pequeña modificación la parte trasera de la motocicleta quedaba formada por un eje de rueda muy estrecho sujeto a dos amortiguadores que se encontraban. Entonces en muchos modelos aparecía una gran diferencia de movimiento entre ambos lados produciéndose de esta manera una inclinación de la rueda trasera con respecto al resto de la moto.

El mundo del chasis sufrió una revolución cuando en el año 1950 las motocicletas Norton empezaron a utilizar el chasis featherbed, este fue un invento de los hermanos McCandless. Este diseño marcó la historia de los chasis, fue tan importante este novedoso chasis que nuestros bastidores de hoy en día tienen influencias de este modelo.

Este chasis de los hermanos McCandless era de doble lazo y poseía una buena rigidez para la época, conseguía un buen reparto de masas y un centro de gravedad bajo. Tenía una de las mejores horquillas telescópicas de la época y la dirección gozaba de un tacto suave y preciso.



**Fiaura 35.** Chasis de los hermanos McCandless [1]

- Vigas

Una alternativa diferente para abordar la necesidad de conseguir una resistencia apta para la torsión y para la flexión se basa en usar un tubo con un radio grande como elemento primario del bastidor. Así se conseguirá un modelo simple y ligero pero con un alto grado de rigidez.

La viga debe tener una buena sección para conseguir los requerimientos estructurales que se le exijan al chasis. Este elemento principal no tiene porque ser circular, podrá adoptar otras formas.

En los años 50 la marca NSU aprovechando el auge de los ciclomotores promocionó rápidamente este tipo de chasis. El tubo estaba formado por dos mitades estampadas y unidas posteriormente mediante soldadura, de esta manera el resultado final de la viga tenía una forma ovalada.

En la NSU la viga se bifurcaba en la parte trasera proporcionando espacio para alojar la rueda trasera, y la sección abierta resultante en la parte interior de los brazos se sellaba con una chapa en forma de U que devolvía la rigidez al modelo. La marca NSU usó chasis fabricados con vigas curvadas para muchos otros modelos de motocicletas de carretera y de carreras.

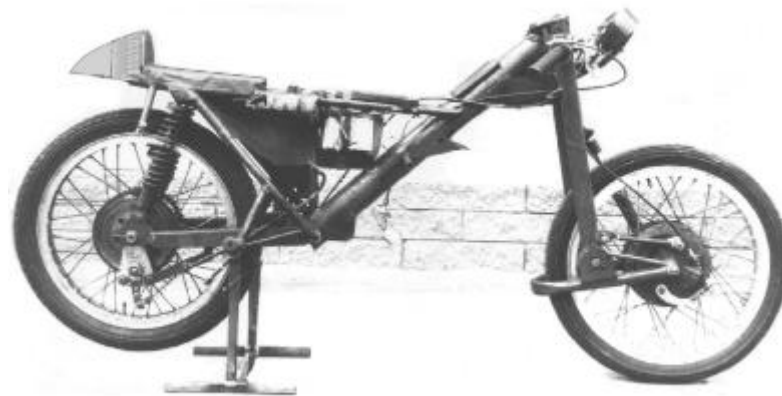


**Figura 36.** *Ciclomotor NSU Quickly*

Con la aparición del basculante trasero se eliminó la exigencia de dividir la viga del chasis al llegar a la zona trasera de la motocicleta, ya que con este sistema de suspensión es el eje del basculante el que conecta directamente con la pipa de la dirección en vez de ser el eje de la rueda el que lo hace.

El basculante debe seguir manteniendo el mismo requisito de mantener la rigidez torsional y lateral. En el modelo de motocicleta NSU Max y en las de competición, la viga estampada hecha en chapa se curvaba hacia abajo en la parte trasera para lograr una conexión directa entre el eje del basculante y el cabezal de la dirección.

Otros modelos de chasis como los de las primeras Honda de Gran Premio y algunos prototipos de Reynolds utilizaban un gran tubo redondo curvado de forma semejante para conseguir el mismo efecto.



**Figura 37.** Primer chasis construido por Tony Foale [1]

Este tipo de chasis presentaba el problema de que realizar una conexión directa del motor con un tubo recto no suele ser posible. Este problema lo salvaron muchos inventores soldando partes de piezas planas de chapa a la viga central para poder realizar la conexión.

La mejor solución que se encontró a dicho problema, ya que servía para conectar motores de cualquier tamaño, consistía en dividir la viga en dos, por lo cual ambas vigas pasaban rodeando al motor, este fue el comienzo del chasis de doble viga que comenzaron a usarse de manera generalizada en la década de los 80. Este modelo de chasis puede conseguir unos resultados extraordinarios de rigidez si se diseña de forma correcta.

#### - Ner-a-car

La motocicleta Ner-a-car de los años 1920 era muy complicada de clasificar dentro de alguno de los tipos únicamente, ya que no utilizaba un cabezal de dirección normal. Este modelo montaba un bastidor compuesto por dos vigas formadas por un perfil de acero estampado.

Esta motocicleta llevaba instalado el eje de dirección en el interior del buje de la rueda delantera, por ese motivo se le acuñaba el término de hub-centre-steering. El eje era horizontal con forma de U y pivotaba en unas orejeras que sobresalían hacia debajo de los extremos de las vigas del chasis. Disponía de unos muelles muy rígidos que proporcionaban un recorrido de suspensión muy corto y que con el movimiento variaban el ángulo que formaba el eje de la dirección.

Aunque las vigas del bastidor se abrían hacia el exterior a la altura del neumático delantero para permitir el giro de la rueda, esta podía girar muy poco. Este modelo presentaba una rigidez torsional dudosa pero tenía muy buena estabilidad debido a su bajo centro de gravedad y a su gran distancia entre ejes.



**Figura 38.** Motocicleta Ner-a-car

### *b) Tipos de chasis*

A continuación se van a describir las diferentes configuraciones de chasis más comunes que pueden incorporar las motocicletas. Esta clasificación de los diferentes tipos de chasis se hace en función de la forma de unión de la pipa de la dirección con el eje del basculante. Tenemos los siguientes tipos [16]:

#### - **Chasis de cuna simple cerrado**

Este tipo de chasis se forma en un único plano vertical con perfiles que parten desde la pipa de la dirección finalizando en el eje del basculante. Esto se consigue de la siguiente forma, desciende un único tubo desde la columna de dirección recogiendo el motor por su parte inferior formando una cuna.

La estructura está formada por tubos huecos o macizos soldados. El motor está situado y sustentado en el interior del chasis. Se trata de un chasis continuo, es decir, no tiene ninguna interrupción en su estructura.

Este chasis se utilizaba antiguamente para motocicletas deportivas con motores de bajas prestaciones. Actualmente estos chasis tienen muy poca cabida en el mercado de las motos.



***Figura 39. Chasis de cuna simple cerrado***

#### - **Chasis de cuna simple abierto**

Este tipo de chasis se desarrolló como una variante del chasis de cuna simple cerrado. La diferencia respecto del modelo cerrado es que ya no se trata de un chasis continuo.

No es continuo ya que el perfil del tubo de la parte inferior se ve interrumpido al aproximarse a la zona del motor. Entonces se utiliza el motor como elemento con el cual se cierra el chasis. Por lo cual, el motor pasa a formar parte de la estructura como elemento estructural resistente.

Este tipo de chasis es muy usado en motocicletas de trial.

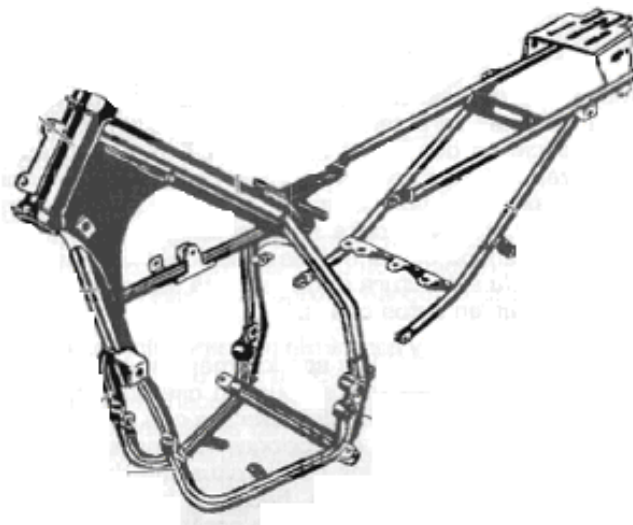


**Figura 40.** Chasis de cuna simple abierto

#### - Chasis de cuna simple desdoblado

Este tipo de chasis es el otro desarrollo que surgió tomando como base el chasis de cuna simple cerrado. Este bastidor se diferencia de su predecesor en lo siguiente, el único tubo que desciende desde la pipa de la dirección se desdobra o bifurca en dos tubos a la altura de la zona del motor finalizando en la parte del eje del basculante separadamente.

Este tipo de chasis es muy usado en motocicletas de off-road y trail.



**Figura 41.** Chasis de cuna simple desdoblado



#### - **Chasis de doble cuna**

Este tipo de chasis está construido de manera que descienden desde la pipa de la dirección directamente dos tubos que pasan por la parte inferior del motor abrazándolo y consiguiendo una forma de cuna, estos dos tubos llegan a la zona del basculante por separado.

Este tipo de construcciones es común en motocicletas tipo custom o en potentes motocicletas de carretera de la época de los 80.



**Figura 42.** Chasis de doble cuna

#### - **Chasis multitubular**

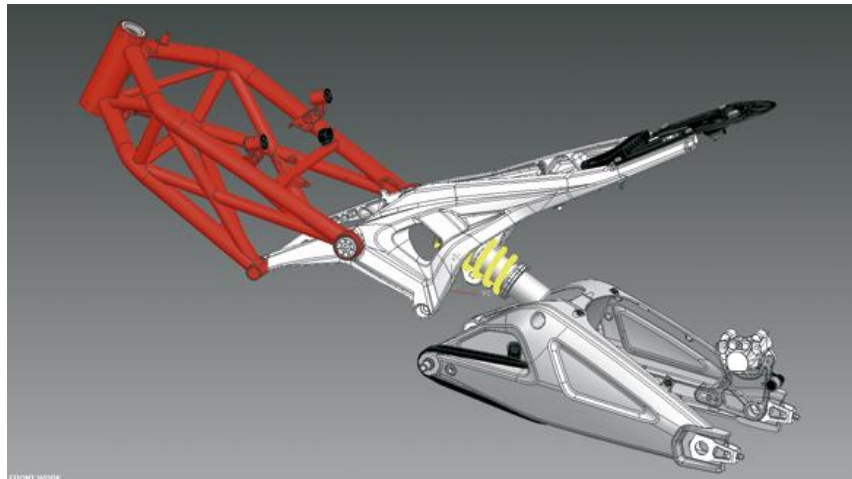
Este chasis está formado por dos vigas situadas a cada lado del motor, estas vigas unen la pipa de la dirección con el eje del basculante. Estas vigas están compuestas por tubos rectos y cortos que están situados formando una celosía.

Dichos tubos de corta longitud suelen ser circulares y aportan al chasis una excelente rigidez. Estos tubos se crean por motivos de diseño para que trabajen sólo a tracción o a compresión.

Este tipo de chasis, al igual que el de cuna simple abierto, a menudo utiliza el motor como un elemento estructural para darle rigidez a la estructura, llegando incluso a ser el motor la pieza en la cual se ancle el basculante.

Este tipo de chasis es muy característico en motocicletas de la marca Ducati.





**Figura 43.** Chasis multitubular

- **Chasis de doble viga perimetral**

Este tipo de chasis está construido con una estructura perfectamente definida por su denominación, ya que está conformado por dos vigas de gran sección que pasan por ambos lados del motor y provienen desde la pipa de la dirección acabando en el eje del basculante.

Las vigas recogen perfectamente al motor por ambos laterales en la zona superior. Generalmente las vigas también integran anclajes inferiores para ayudar a soportar el motor.

Es un tipo muy común en motocicletas deportivas.



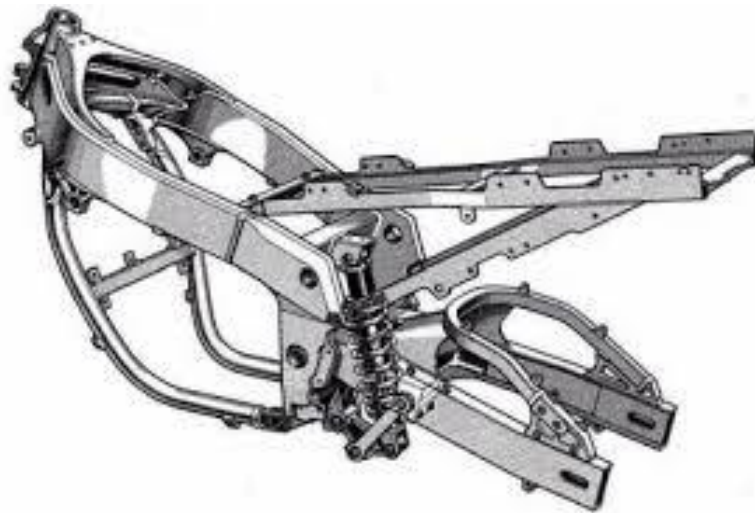
**Figura 44.** Chasis de doble viga perimetral

#### - **Chasis de doble viga perimetral cerrado**

Este chasis es un modelo que toma como base el bastidor de doble viga añadiéndole ciertas modificaciones que le dan una forma más cerrada.

Este está formado por las mismas dos vigas que rodean al motor por la parte superior del lateral y otros dos tubos de sección menor que nacen en la pipa de la dirección y van por debajo del motor hasta llegar a zona del basculante dejando una clara forma de cuna.

Este chasis fue muy utilizado en motocicletas de carretera y deportivas de la década de 1990.



**Figura 45.** Chasis de doble viga perimetral cerrado

#### - **Chasis monocasco**

Es un tipo de chasis que fue muy utilizado por la marca italiana Vespa durante muchos años en todos sus modelos de motocicletas. Se trata de un bastidor monocasco autoportante de chapa estampada que hace simultáneamente las funciones de carrocería y de chasis.

Este tipo ha sido usado también para motocicletas deportivas de la marca Kawasaki.



**Figura 46.** Chasis monocasco

- **Chasis monoviga**

Es un chasis que toma forma de viga. Comienza en la pipa de la dirección, pasa por la parte superior y acaba en el eje del basculante. La viga va variando de sección en función de la parte por dónde discurra.

El motor se queda colgado por debajo de la espina o viga central que da forma al chasis. Desde la espina central salen unos soportes utilizados para anclar el motor de manera que este quede perfectamente fijado y realice la función de elemento estructural.

Este chasis es muy usado en motocicletas de carretera tipo naked.



**Figura 47.** Chasis monoviga

#### - Chasis tipo omega

Es un tipo de chasis muy complicado de ver debido a su escaso uso pero merece la pena comentar sobre el debido a su extravagancia. Fue utilizado en modelos como la Yamaha GTS o Bimota Tesi.

El nombre de este chasis tiene origen en su parecido a la forma de la letra griega omega. Lo más destacable de este bastidor es la horquilla delantera, la cual tiene una forma similar al basculante pero permite el giro para poder cambiar la dirección de la marcha. Se utilizan entramados tubulares como elementos estructurales para soportar el cabezal de la dirección.

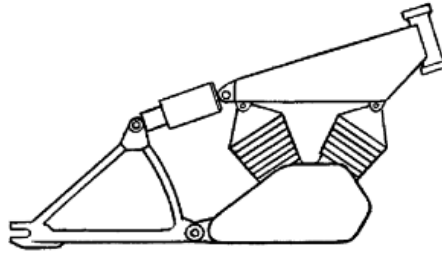


**Figura 48.** Chasis tipo omega

#### *c) El motor como elemento estructural*

El primer ejemplo destacable del uso del motor como elemento estructural de la motocicleta lo encontramos en la P&M o Panter. En este caso los dos cilindros del motor estaban colocados muy elevados y hacían la función de chasis. Las tensiones que llegaban al cilindro y a la culata eran reducidas debido a unos pernos que iban desde la culata al cárter. También montaba unos pernos con forma de U que descendían dando la vuelta por la parte inferior de los lugares donde se situaban los rodamientos principales [1].

Después de la Segunda Guerra Mundial gozaron de gran acogida y éxito las motocicletas Vincent, las cuales montaban motores de dos cilindros en V y un bastidor monoviga de forma rectangular fabricado en chapa soldada. Este chasis estaba atornillado al cabezal de la dirección y a las dos culatas, y desempeñaba adicionalmente la función de depósito de aceite de 3.5 litros. La forma triangulada del basculante destacaba junto con su eje que se situaba detrás de la caja de cambios, mientras los amortiguadores traseros se fijaban a la parte trasera de la espina.



**Figura 49.** Chasis de la Vincent-HRD [1]

#### *d) Chasis de off-road*

Los chasis de las motocicletas de off-road, debido al uso para el que van a estar destinados, tienen que estar diseñados teniendo en cuenta el gran compromiso con la rigidez que van a requerir durante su vida. Estas motocicletas tienen una alta relación potencia-peso, por lo que tienen que cumplir el compromiso de tener una alta rigidez pero intentando lograr un bastidor con el menor peso posible.

Los primeros modelos de este tipo de motocicletas surgieron a mediados del siglo pasado e incorporaban bastidores de cuna simple cerrada. Estos modelos gozaron de gran popularidad y consiguieron unos buenos resultados en cuanto a lo que a rigidez se refiere.



**Figura 50.** Montesa enduro 250 K con chasis de simple cuna cerrado

Posteriormente se cambió la tendencia y se empezaron a diseñar este tipo de motos con chasis de cuna simple desdoblado y chasis de doble cuna. Estos nuevos diseños mejoraban la resistencia y la estabilidad de los bastidores que había hasta el momento.

La tendencia actual más común en el diseño de este tipo de motocicletas es llevara a cabo su construcción con un bastidor de doble viga desdoblado en la parte inferior. Los diseños actuales consiguen muy buenas prestaciones debido a los estudios de resistencia que hay detrás de sus diseños y a la experiencia que se tiene en el campo.

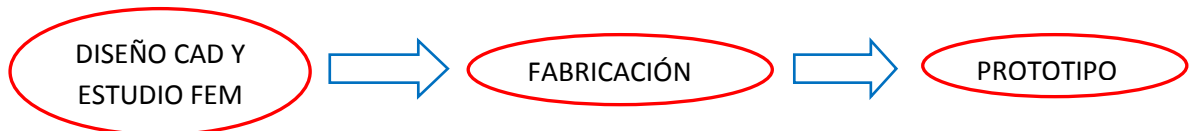


**Figura 51.** Chasis de doble viga desdoblado en la parte inferior



### *e) Proceso de modelado y fabricación*

Antiguamente se realizaba la fabricación de un bastidor mediante la técnica de ensayo y error. Actualmente la técnica ha evolucionado mucho, y el proceso básico de diseño de un chasis teniendo el motor que se quiere alojar en el interior sigue el siguiente proceso:



#### ○ **Diseño CAD y estudio FEM**

Antes de comenzar a diseñar el nuevo modelo de chasis hay que tener claro las cotas que se desea que tenga la motocicleta y el tipo de bastidor que se quiere obtener. Hay que tener en cuenta cómo se van a colocar las masas en el nuevo diseño, considerando que cuanto más concentradas en un punto mejor, ya que así se conseguirá una mejor manejabilidad de la motocicleta. No hay que olvidarse tampoco de que el motor ocupa mucho espacio y tiene una posición prácticamente predefinida, entonces sólo se podrá desplazar de su posición inicial unos pocos centímetros.

Una vez que se tiene toda esta información clara se comienza con el diseño usando un software CAD, el uso de un software concreto viene determinado por las preferencias del diseñador o por la disponibilidad de alguno en concreto.

Se comienza dibujando el primer boceto del chasis en 3D, así se observa el aspecto básico que va a tener nuestra estructura. A partir de esta primera aproximación se irán realizando modificaciones hasta conseguir un bastidor con la apariencia deseada y que se adapte perfectamente con el resto de componentes de la motocicleta.

Cuando ya se disponga de la estructura optimizada se pasará a realizar el estudio del comportamiento de la estructura, esta parte es la más compleja y se realiza con un programa mediante el método de elementos finitos (FEM).

Una parte muy importante previa para poder aplicar el método FEM es tener claro que esfuerzos se le van a aplicar al chasis para probar su fiabilidad en las diferentes situaciones críticas a las que podría estar expuesto en su uso real. También es muy importante esto para poder estudiar la vida a fatiga que tendrá la estructura.



El proceso tiene lugar de la siguiente manera, primero se importa el archivo CAD al módulo FEM, luego se programan los esfuerzos que se quiere aplicar a la estructura introduciendo el tipo, valor, posición, dirección y sentido concretos, y finalmente se estudian los resultados obtenidos.

Si los resultados obtenidos en el estudio por FEM son positivos se da por bueno el diseño y se pasa a la siguiente fase. El problema se da cuando los resultados del estudio no son los esperados o no son aceptables. Esto ocurre a menudo y hay que proceder a resolver el problema modificando el diseño y repitiendo la prueba de su comportamiento. Este proceso se repetirá hasta conseguir unos resultados positivos en el estudio.

#### ○ **Fabricación**

En esta fase se lleva a cabo la planificación de la construcción del bastidor diseñado y probado en la fase anterior como definitivo. Con las técnicas actuales de fabricación cada día se pueden crear piezas con menos imperfecciones, pero hay que tener precaución ya que un tratamiento térmico o una soldadura mal realizada puede llevar a un fallo catastrófico de la pieza en una situación inesperada.

La tendencia actual de los fabricantes es realizar el bastidor en una sola pieza si es posible para mejorar de esta manera los resultados, esto se consigue fabricando la pieza por fundición o bien por infección. También se sigue la tendencia de usar estructuras con forma de panal de abeja para mejorar las prestaciones de la estructura.

Esta fase tiene gran complejidad, ya que hay que combinar múltiples factores para conseguir unos resultados óptimos. Un error mínimo de planificación en esta fase podría echar por tierra todo el proceso en la siguiente fase, teniendo que volver a esta fase para subsanar el error, con los consiguientes gastos económicos y el retraso pertinente.

#### ○ **Prototipo**

La última fase del proceso consiste en la propia fabricación del prototipo. Este es sometido a diferentes de pruebas para comprobar la veracidad de los resultados positivos obtenidos en la primera fase y otros estudios que sólo se pueden llevar a cabo con un modelo real. Estas últimas pruebas son pruebas de resistencia, pruebas de duración estimativa...

Estos estudios con el prototipo real se llevan a cabo mediante el uso de unas galgas extensiométricas, estas se colocan estratégicamente y muestran la deformación que sufre el chasis en las zonas más críticas.

Si obtenemos resultados satisfactorios en esta última fase ya se daría por terminado el proceso satisfactoriamente y se podría proceder a la fabricación en serie del modelo. Si por el contrario se obtuvieran resultados que no fueran los deseados habría que volver a repetir todo el proceso hasta conseguir resultados satisfactorios [19].



**Figura 52.** Prototipo de motocicleta con rasgos futuristas

## II. Programas usados

Para este proyecto se decidió elegir como software, tanto para el diseño como para el estudio del comportamiento mediante el método de elementos finitos (FEM), el programa *SolidWorks versión 2015*. Se escogió este programa debido a la versatilidad y a la multitud de posibilidades que ofrece sin ser un software muy complejo de usar.

Este programa tiene varios módulos, en el diseño del chasis se utilizó el módulo de diseño para diseñarlo y el módulo de simulación para estudiarlo con FEM.

### 1. Diseño del chasis

#### *a) Introducción al concepto de CAD*

Lo primero a realizar, para introducir la parte de diseño, es definir e introducir el término CAD. Este significa como sus propias siglas en inglés manifiestan: Computer Aided Design, esto traducido al castellano significa Diseño Asistido por Ordenador. Como una interpretación muy general se puede entender esto como la aplicación informática de la fase de diseño de una pieza o elemento [18].

Estos software pueden ser utilizados en la mayor parte de las tareas que incluye el proceso de diseño, usando el punto como el elemento con mayor uso. La gran acogida de estos programas se basa en la reducción de tiempo que se obtiene con su utilización en la fase de diseño, sobre todo en la parte de revisión y verificación de la pieza obtenida. Esto es en gran parte debido a la utilización de sistemas gráficos interactivos, con los cuales se pueden hacer cambios en el modelo observando al instante las modificaciones realizadas y percatándose de las posibles repercusiones de dichas modificaciones en el diseño.

Una aplicación CAD es un sistema software que desempeña la automatización total del desarrollo de diseño de una cierta pieza. Esto significa que por medio de la representación computacional del objeto posibilita hacer de forma automática un dibujo al detalle, su documentación y modelos numéricos para originar simulaciones sobre el modelo como otra opción a la construcción de prototipos.

Entonces, como conclusión de la parte introductoria a la fase de diseño de los métodos CAD, este supone un destacable ahorro en la duración que repercute en el precio final del producto, debido a que posibilita adelantar el momento en el cuál se perciben algunos fallos de diseño.

Hay disponibles varios modelos de CAD, todos requieren una manera de pensar distinta por parte del diseñador para su utilización y diseño del modelo virtual. En cuanto al modelado de sólidos tenemos dos tipos a disposición del usuario:

- Modelado de sólidos 3D paramétricos: Esto posibilita al diseñador el uso de lo que se denomina Diseño Intencional.
- Modelado 3D directo: Posibilita al diseñador modificar la geometría del modelo sin un árbol histórico de operaciones. Con este modelo directo, después de usar el boceto para la creación de la geometría, el boceto evoluciona para incorporarse a la nueva geometría y el usuario sólo edita el modelo sin la utilización de los primeros bocetos.

### *b) Introducción al programa SolidWorks*

El módulo de diseño de SolidWorks dispone de un gran potencial a la hora de diseñar ofreciendo muchas ventajas como funciones que aumentan la productividad, garantizan la exactitud, ayudan al diseñador a transmitir toda la información de diseño de forma más eficaz y ayuda a buscar los errores en el diseño.

Este software gestiona todos los aspectos del modelado y ensamblaje de piezas con el sistema de diseño en 3D proporcionando una gran diversidad de tareas que le dan versatilidad y flexibilidad. Se trata de un programa de uso diario con potentes cualidades que permiten gestionar todos los aspectos del proceso de diseño garantizando una buena calidad.

Con SolidWorks, se dispone de un sistema de CAD en 3D intuitivo que combina la facilidad de uso con funciones de modelado potentes que pueden gestionar los proyectos de diseño más complejos. SolidWorks acelera el diseño, por lo que ahorra tiempo y costes de desarrollo, y aumenta su productividad.

Entre las funciones del SolidWorks, en lo que a diseño se refiere, destacan:

- El **modelado de sólidos en 3D**, con el que se convierten las ideas y conceptos en diseños virtuales 3D.
- El **diseño conceptual**, que permite comenzar a diseñar de forma instantánea por medio del uso de imágenes reales importadas, sencillos bocetos o datos escaneados en 3D y que permite añadir detalles mientras se va realizando el diseño.
- La **edición directa del modelo**, que permite modificar directamente la geometría en 3D.
- El **diseño de ensamblajes grandes**, permitiendo gestionar productos y sistemas de gran tamaño y complejidad.

- El **diseño de superficies avanzadas**, generando formas orgánicas complejas
- El **diseño de chapa metálica**, permite generar piezas de chapa metálica de fabricación simple.
- Las **piezas soldadas**, permite generar de manera sencilla soportes y bases para estructuras.
- El **diseño de piezas de plástico**, pudiendo crear piezas plásticas de manera sencilla.
- Las **herramientas de productividad de CAD**, aportando funciones especiales que ayudan a trabajar de manera más eficiente.
- La **ingeniería inversa**, permite usar datos escaneados en 3D generados desde diseños ya creados para facilitar la generación de nuevos productos.
- El **diseño de moldes**, genera moldes y utillajes para producir piezas de diferentes materiales.
- El **diseño de tuberías y tubos**, permite acabar los diseños incorporando sistemas hidráulicos o neumáticos.
- El **diseño de conductos y mazos de cables eléctricos**, incluyendo sistemas de control, de potencia y otros sistemas imprescindibles en el diseño.

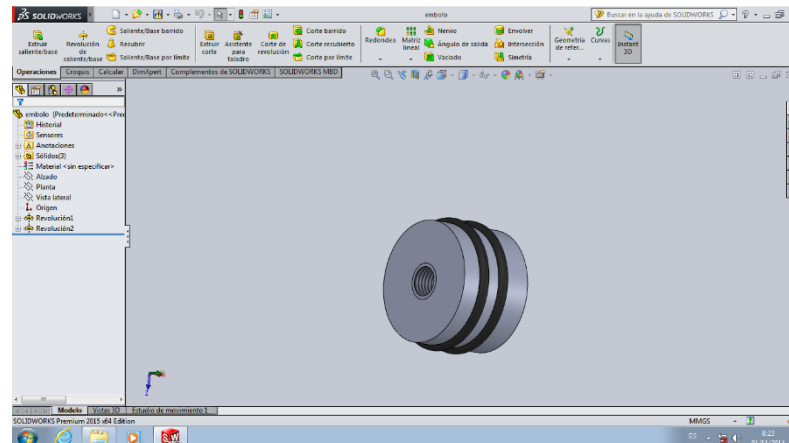
Se va a exponer a continuación ciertos elementos del SolidWorks para familiarizarse un poco con su funcionamiento básico:

- **Ventanas:**

En este software las ventanas se componen de dos paneles, uno suministra datos no gráficos y el otro suministra una imagen de la pieza, del ensamblaje o del dibujo.

El panel situado en la parte izquierda de la pantalla alberga el gestor de diseño de Feature Manager, el Property Manager y el Configuration Manager. Haciendo clic con el ratón en cada una de las pestañas situadas en la parte superior de este panel se puede observar como modifica el contenido de la ventana.

El panel situado en la parte derecha de la pantalla es la franja de gráficos en la cual se genera y modifica la pieza, el ensamblaje o el dibujo. Fijando la vista en la franja de gráficos se observa que la pieza está representada en tono sombreado, en color y en una vista isométrica.



**Figura 53.** Pantalla standard de SolidWorks

- **Barra de herramientas:**

La botonera de esta barra consiste en un conjunto de accesos directos para funciones o comandos que son de uso constante. Se puede modificar la ubicación y la visibilidad de esta barra en función del tipo de documento, ya sea pieza, ensamblaje o dibujo.

El software tiene la función predeterminada de recordar cuáles son las barras de herramientas a exponer y en qué lugar exponerlas en función del tipo de documento con el que se esté trabajando.



**Figura 54.** Barra de herramientas de SolidWorks

Al hacer clic en ver y seleccionar barra de herramientas, se muestra una lista con todas las barras de herramientas. Las barras de herramientas que llevan una marca de verificación junto a su denominación o que sus iconos se encuentran oprimidos, son las que están visibles. Las barras de herramientas que no muestran dichas características no están visibles.

Para poder consultar los comandos hay que activar y desactivar varias barras de herramientas.

- **Command Manager**

Se trata de una barra de herramientas que cambia con el contexto y se actualiza de manera dinámica en función de cuál sea la barra de herramientas a la que se quiera acceder. Tiene barras de herramientas instaladas de forma predeterminada en función del tipo de documento.

Al realizar un clic sobre un botón en la parte de control el Command Manager se actualiza para enseñar dicha barra de herramientas. Se utiliza el Command Manager para conseguir el acceso a la botonera de la barra de herramientas en una ubicación central y así conseguir aumentar el espacio para la parte de gráficos.



**Figura 55.** Command Manager de Solidworks

- **Botones del ratón**

Las funciones de los botones del ratón son las siguientes:

- El botón izquierdo sirve para seleccionar elementos del menú, piezas en la zona de gráficos y objetos.
- El botón derecho sirve para mostrar los menús relacionados con el contexto
- La ruleta situada en el medio sirve para trasladar, girar, acercar y alejar la vista de la pieza o ensamblaje y consigue una vista del dibujo panorámica.

- **Menús contextuales**

Los menús contextuales ofrecen la posibilidad de acceder a una gran variedad de herramientas y comandos mientras se maneja el programa. Cuando se desplaza el ratón sobre la geometría en el modelo, sobre los elementos en el gestor de diseño del Feature Manager o sobre los bordes de la ventana del software, al hacer clic usando el botón derecho del ratón aparece un menú contextual con funciones correspondientes al elemento en que se ha hecho clic.

Es posible conseguir entrar al menú de más comandos haciendo clic sobre las dobles flechas abajo en el menú, entonces se extiende el menú contextual para dar cabida a más elementos del menú.

El menú contextual ofrece una forma más eficiente de usar el programa sin estar moviendo continuamente el ratón hasta los principales menús desplegables o la botonera de la barra de herramientas.



### *c) Diseño intencional*

El diseño intencional no trata de un concepto abstracto, sino de una idea concreta con una intención determinada. Este tipo de diseño se podría definir de forma sencilla como intención en el diseño [18].

La utilización del diseño intencional se da sobre todo cuando se manejan software de modelado paramétrico de sólidos como puede ser SolidWorks, Solid Edge o Catia. El diseño paramétrico de forma muy genérica se puede definir como un modelo que consta de diversas variables o parámetros que tienen relación con ciertas características del modelo. El modelado 3D es un instrumento indispensable hoy en día en el mundo de la ingeniería, esto es posible gracias a estas relaciones paramétricas o relaciones significativas.

Durante el principio de la década de los 90 sólo se disponía de un software CAD en 2D, pero tenía el inconveniente de que no era posible la incorporación de este modelo al diseño. Estos CAD bidimensionales exponían la geometría de un dibujo, pero no guardaban más información que donde se encontraba el principio y el final de la línea trazada, o el diámetro de la circunferencia...

Posteriormente, cuando estaba finalizando la misma década de los 90, se inventó el software CAD 3D que posibilitó la visualización de una imagen virtual del diseño, y entonces con esta imagen se fue asociando diversidad de documentación en el archivo del diseño. Esta documentación contenía desde información sobre toda la geometría de la pieza necesaria para su fabricación hasta información puramente física como es el material del que estaba hecha la pieza, su densidad, peso y volumen o información paramétrica del modelado como los puntos clave, puntos medios, puntos de tangencia, puntos de referencia en aristas, simetrías, matrices... El nuevo software ofrecía la ventaja de que toda esta información podía ser modificada en cualquier momento. Esta ventaja tenía la consecuencia de que después de que se hayan realizado los cambios, se produce un rediseño que trae consigo una actualización de manera automática por las relaciones significativas realizadas en el diseño intencional.

A la hora de diseñar un modelo robusto y editable de manera sencilla hay que tener en cuenta el proceso de construcción del diseño, ya que los modelos están hechos para cumplir con una función. Esto se explica de la siguiente manera, si se realiza un pequeño pronóstico durante la fase de diseño sobre ciertos procesos de producción, posteriormente cuando se edite el diseño del modelo se continuará con dicha intención y el producto será robusto frente a estas modificaciones.

Entonces, en el diseño intencional siempre hay que tener en cuenta la regla principal, esta consiste en realizar el mayor uso permitido de las relaciones geométricas que posibilite el programa CAD. Pero solo determinando las medidas, datos o parámetros esenciales que sean de gran importancia y que no varíen en el diseño.

Este diseño también se ve reflejado en el trabajo ordenado y coherente, haciendo que el usuario que realice ciertas modificaciones en el diseño, sea o no la persona que ha realizado el diseño desde el comienzo, pueda entender las operaciones realizadas y el orden de estas. Para ayudar a esto, la mayor parte de los programas CAD, denomina a todas las operaciones del dibujo de forma de cómo se haría en la realidad, esto junto con la creación de un árbol de operaciones lógicamente ordenado consiguen el objetivo de que el trabajo de rediseño se pueda realizar de una manera fácil sin que produzca fallos a posteriori de las modificaciones.

### *d) Parametrización y forma de trabajo*

Como bien se ha definido anteriormente, el diseño intencional de SolidWorks se basa en la actividad de diseñar para que en un futuro se pueda rediseñar este modelo.

Otro concepto que también ha sido tratado es la existencia de software CAD con la función de parametrización cómo es SolidWorks, el cual tiene un diseño paramétrico-variacional con el que se pueden solventar los problemas surgidos del diseño de piezas clásico. Estos problemas eran en gran parte la carencia de edición de los diseños después de su creación y la complicada forma de organización y la complicada matemática imprescindible para el buen funcionamiento del diseño de conjunto de objetos y referencias. Esta tipología de modelado se basa en dos puntos claves:

- Parámetro clave: Ofrecen la posibilidad de tener el control de la geometría de un diseño pudiendo editar el valor el número de veces que sea necesario en el proceso y en un marco de valores probables que debe ser lo más grande que se pueda.
- Funciones geométricas inteligentes: Son herramientas que simplifican el diseño de la pieza por medio del uso de procedimientos parecidos a los usados en los procesos de construcción de la realidad. El proceso de modelado de un objeto se hace tomando las etapas conceptuales semejantes de la misma fabricación.

Hay que saber también que se opera con un diseño asociativo intra-módulos, entonces nuestro software SolidWorks requiere, desde el comienzo, modelar con relación entre croquis y operaciones. Esto se debe al diseño del croquis-base, que es obligar a que cada operación esté asociada unívocamente y desde el inicio a los croquis en los cuales se

sustenta. Todos los cambios de ciertos de los parámetros del croquis base repercutirán cambiando el diseño final. Editando las medidas del croquis cambia el modelo.

También cabe destacar que se utiliza a la hora de diseñar con este software, el diseño asociativo extra-módulos. El software SolidWorks recoge y administra la información en tres módulos de guardado esenciales: Pieza, plano y ensamblaje. La propiedad asociativa posibilita el establecimiento de la modificación de una de las variables en uno de los módulos anteriores y que dicho cambio se haga presente en un tiempo real y sea efectivo con todas sus consecuencias en los otros módulos, esto se producirá cuando estos ficheros hagan referencia al propio modelo. Si se cambiasen las medidas del plano se modificaría el modelo.

Todo lo contado anteriormente nos da como resultado una manera de operar ordenadamente y coherentemente con el principio del diseño intencional, adicionalmente de que:

- El software se convierte en intuitivo y acogedor para el diseñador
- Ante los cambios problemáticos que puedan aparecer el modelado de piezas se vuelve robusto.
- Tiene la opción de conseguir familias enteras de objetos partiendo solamente desde un determinado modelo inicial.
- Un determinado cambio en un modelo puede repercutir en todos los elementos comprendidos en dicho cambio. Entonces esto no requiere que el diseñador CAD tenga que repasar detenidamente cada objeto del diseño después de cada pequeña modificación.

## 2. Estudio FEM

### *a) Introducción a FEM*

#### INTRODUCCIÓN

Los problemas clásicos generalmente ofrecen la posibilidad de poder resolverse por medio de los diferentes campos de la mecánica, estos campos son [18]:

- Mecánica teórica: Se trata de la parte de la mecánica basada en las leyes de la misma. Estas son las leyes de Newton y las leyes de la cinemática.
- Mecánica aplicada: Esta parte se basa en la transferencia de la teoría a las aplicaciones de ingeniería produciendo modelos matemáticos que muestran fenómenos físicos.
- Mecánica numérica: Se suele utilizar para problemas que presentan complicaciones analíticas. Para su uso hay que saber interpretar los resultados que nos ofrece el software al realizar la mecánica computacional.

Un problema clásico puede ser en función de su dependencia con el tiempo:

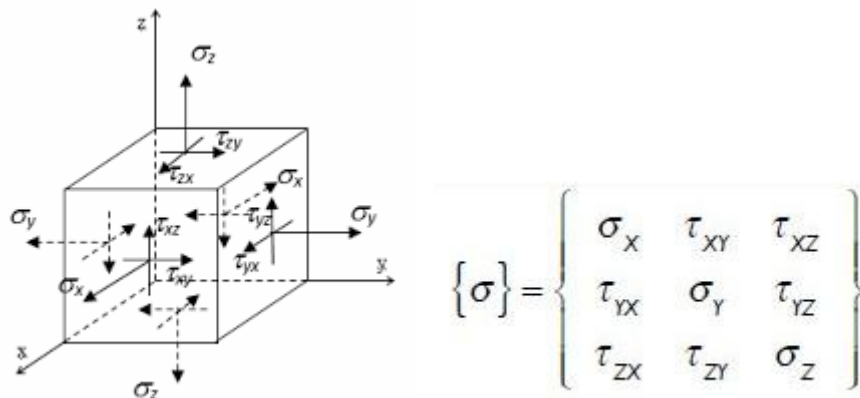
- Estático o cuasiestático: En estos casos no hay una dependencia del tiempo y las fuerzas inerciales son inexistentes o despreciables.
- Dinámico: Estos problemas tienen una importante dependencia del tiempo y en ellos intervienen de forma decisiva las fuerzas inerciales.

Otro factor a tener en cuenta en un problema clásico es el comportamiento del mismo:

- Lineal: Ofrecen una respuesta lineal cuando surge una alteración.
- No lineal: Este comportamiento está ligado al modo de comportarse del material y a la geometría del diseño.

La discretización de un problema complejo de la rama de ingeniería se realiza mediante un modelo matemático que lo escenifica. Se realiza una subdivisión en partes o elementos y se unen todas para la resolución del problema entero.

En un sistema discreto, los elementos a separar y los nodos se pueden distinguir de manera fácil. En el caso de que estos no lo sean, se crea un modelo matemático partiendo de ecuaciones diferenciales (elasticidad en 3D). A este tipo se le denomina sistemas continuos.



**Figura 56.** Elasticidad tridimensional

La resolución de un modelo matemático que tiene una complicada obtención, de un modelo continuo de infinitos grados de libertad, se basa en resolverlo como un modelo discreto de finitos grados de libertad.

## DEFINICIÓN Y FORMA DE TRABAJO DEL FEM

El método de elementos finitos, también conocido por sus siglas inglesas FEM o por sus siglas castellanas MEF, es un procedimiento basado en el cálculo que toma en consideración al cuerpo subdividido en diversos elementos discretos con vinculaciones entre sí, creando un sistema de ecuaciones para solucionarlo mediante métodos numéricos.

El FEM está pensado para ser utilizado en problemas con condiciones de contorno impuestas. Hay ciertos problemas que únicamente se podría encontrar su solución aplicando MEF, esto es debido a que el problema no posee solución o posee una solución analítica de difícil obtención. Entonces los problemas basados en sistemas complejos se resuelven con modelos matemáticos.

El FEM en su origen está desarrollado básicamente para el análisis estructural pero también puede presentar:

- Fenómenos termodinámicos: Se obtiene el gradiente de temperaturas de un cuerpo.
- Simulación de efectos dinámicos: Se utiliza para casos como puede ser el choque ocasionado entre dos sólidos
- Geomecánica: Se obtiene el comportamiento de la corteza terrestre
- Corriente eléctrica y electromagnetismo: Su uso está basado en la simulación de instalaciones y de instrumentos.
- Acústica: Utilizado para la simulación de los efectos de las ondas del sonido.

El MEF funciona en su base como una representación por un ensamble de subdivisiones denominadas elementos, estos se interconectan por medio de nodos. Esta es la discretización del medio continuo en un sistema de sólidos de menor tamaño que cuando se juntan forman el modelo original.

Una buena aproximación a la forma de trabajar de FEM sería la siguiente resolución, un problema dado es discretizado dividiendo el dominio de forma simplificada. Cada nodo tiene posibilidad de movimiento en seis direcciones distintas: tres traslaciones y tres rotaciones, estos son los grados de libertad de un nodo. La solución obtenida para cada parte por separado se combina con el resto a fin de conseguir la solución global.

La solución del problema reside en hallar los desplazamientos, y con estos se obtendrán las tensiones y las deformaciones. Las fuerzas externas y los desplazamientos se vinculan por medio de la rigidez y relaciones constitutivas. El material asignado define las propiedades de los sólidos, determinando la rigidez de este, y la geometría de la estructura (por medio de las Leyes de la Elástica).

En régimen elástico se relacionarían los desplazamientos y las fuerzas externas de la siguiente manera:

$$[K]_e \cdot \{\delta\}_e = \{F\}_e$$

$[K]_e$  = matriz de rigidez del elemento  
 $\{\delta\}_e$  = vector desplazamientos del elemento  
 $\{F\}_e$  = vector de esfuerzos del elemento

**Figura 57.** Relación fuerza-desplazamiento en régimen elástico

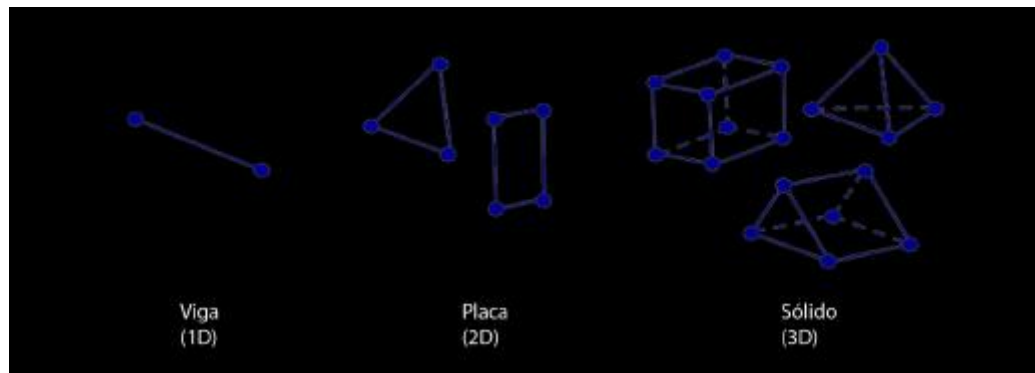
A continuación se arma la matriz de rigidez global con las matrices de rigidez de los elementos, así como los vectores fuerza. Esto ofrece como solución la ecuación matricial que cubre toda la estructura. Posteriormente se introducen las condiciones de contorno, dejando así el modelo restringido.

Después matemáticamente, se borran las columnas y las relacionadas con los grados de libertad que han sido limitados con la ecuación matricial global. Entonces, la ecuación matricial se soluciona para hallar desplazamientos nodales y las tensiones de deformación de los elementos se hallan partiendo de los desplazamientos nodales.

Los diferentes tipos de elementos finitos en FEM se clasifican en:

- Tipo beam o viga (1D): Estos elementos lineales tienen la función de modelar elementos largos y estilizados, y pueden ser barras, vigas...
- Tipo plate o placa (2D): Estos elementos planos tienen la función de modelar partes de estructuras de formas planas, y pueden ser membranas, placas...
- Tipo solid o sólido (3D): Estos elementos sólidos tienen la función de modelar voluminosos.

Cabe destacar por su utilidad común, la utilización de la mezcla de estos elementos actuando en conjunto.



**Figura 58.** Tipos de elementos FEM

## PASOS PARA EL ANÁLISIS CON FEM

La fase de análisis por elementos finitos se describe con los siguientes pasos:

- 1- Se realiza una representación de la estructura de forma que quede estructurada de manera continuada, como una recopilación de elementos discretos enlazados mediante nodos. Se realiza el modelado y el mallado del modelo.
- 2- Se deriva las matrices de rigidez de las propiedades del material, propiedades de elemento y geometría. Se definen las propiedades del material.
- 3- Se ensamblan las matrices de rigidez de los elementos en una matriz de rigidez general “K”.



- 4- Se ensamblan las cargas en un vector general de fuerzas “F”. Se realiza la aplicación de fuerzas.
- 5- Se aplica las condiciones de contorno con el fin de restringir el modelo
- 6- Se resuelve la ecuación matricial “ $K \cdot U = F$ ”
- 7- Se obtienen las deformaciones y las tensiones de los resultados de los desplazamientos

Los pasos 1, 2, 4, 5 y 7 necesitan las decisiones del diseñador, los otros pasos se procesan de forma automática por el software.

Se debe tener en cuenta que el uso del programa generalmente no conlleva la consecución de la solución real y exacta, si no de una solución aproximada. También hay que tener en cuenta que se deja a juicio del diseñador el saber diferenciar entre un resultado lógico de uno que no es lógico, además de percibir los márgenes de error y las limitaciones del modelo y el método.

## TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS

A continuación se va a describir las características de los elementos más utilizados: truss, beam, plane stress, plane strain, axisymmetric, membrane, plate, shell, solid ó brick, tetrahedral, hexahedral, boundary, y gap. Los software comerciales tienen un gran número de ellos, aunque parte mayoritaria de todos los diseños se pueden llevar a cabo con los elementos más básicos.

En función de su dimensión, se pueden clasificar en:

1. De línea: Truss, beam y elementos de restricción
2. De area: Plane stress, plain strain, axisymmetric, membrane, plate y shell
3. De volumen: Solid ó brick, tetraedral y hexaedral

- Elementos unidimensionales
  - Elementos TRUSS
    - Características:
      - ✓ Elemento sometido únicamente a 2 esfuerzos
      - ✓ Se utilizan estos elementos para modelar una estructura cuando:
        - Tienen una longitud que supone entre 8 y 10 veces su medida de alto o de ancho.
        - No transfiere momentos por los pasadores por los que está conectada a la estructura.
        - Sólo son aplicables cargas externas si estas se encuentran en los extremos y colocadas paralelas al mismo.

- A estos elementos sólo se les puede aplicar carga axial, por lo que sólo pueden estar sometidos a compresión o a tracción.
  - El área axial será la única propiedad a especificar
  - Los nodos de estos elementos solamente poseen tres grados de libertad, que son los tres desplazamientos.
- Elemento BEAM:
- Es el elemento que tiene mayor uso, ya que es usado para modelar estructuras, uniones mecánicas, conductos, tuberías...
  - Este elemento puede estar sometido tanto a cargas axiales como transversales o a momentos flectores. Esto supone una gran diferencia respecto al elemento TRUSS.
  - Las propiedades a especificar además del área axial son el momento de inercia y la resistencia a la torsión.
  - Los nodos de estos elementos ya poseen seis grados de libertad, que son las tres rotaciones sobre los ejes globales y los tres desplazamientos.

- Elementos bidimensionales

Existen los siguientes tipos de elementos bidimensionales:

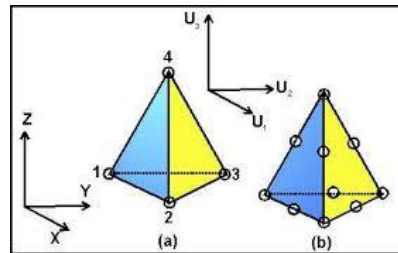
- Plane Stress Elements: Esfuerzo plano
  - Plane Strain Elements: Deformación plana
  - Axisymmetric Elements: Elementos Axisimétricos
- Elementos sometidos a esfuerzo plano y deformación plana
    - ✓ Hay dos tipos básicamente: Triangular y Cuadrilátero  
Se modelarán como esfuerzo plano o como deformación plana en función del tipo de esfuerzo
      - Es preferible la utilización de cuadriláteros por razones de isotropía geométrica
      - La utilización de triángulos es necesaria por razones de irregularidades en la geometría del modelo
    - ✓ Las estructuras axisimétricas sometidas a cargas axisimétricas tienen la posibilidad de ser modeladas como modelos bidimensionales, en analogía a casos de deformación y tensión plana.

- Elementos elásticos tridimensionales o elementos brick

Son elementos de tres dimensiones que poseen tres grados de libertad traslacionales por nodo. Normalmente los nodos son introducidos en la intersección de tres planos y suelen aportar información sobre la deformación y la tensión.

- Elementos tetraedral o hexaedral

Estos elementos se pueden percibir como triángulos o cuadriláteros observados en tercera dimensión, respectivamente. Normalmente los nodos son introducidos en la intersección de tres planos y suelen aportar información sobre la deformación y la tensión. Generalmente suelen poseer tres grados de libertad por nodo, teniendo ocho nodos. La precisión de estos puede verse incrementada si se sitúan mayor número de nodos por cada arista.



**Figura 59.** Elementos tetraedrales FEM

### Selección del tipo de elementos

Previamente a realizar la elección del tipo de elemento se debe realizar lo siguiente:

1. Se realiza un esquema del modelo físico indicando: geometría, condiciones de contorno y cargas, y discontinuidades de geometría y material. Además de sistemas de coordenadas y dimensiones.
2. Se examinan las posibles simplificaciones o reducciones, como la reducción de modelos tridimensionales a modelos bidimensionales por casos de deformación plana, tensión plana o axisimetría:
  - Elementos beam o truss: utilizados en casos de cargas axiales o transversales en elementos mecánicos, eléctricos o estructuras civiles.
  - Elementos de esfuerzo planos son adecuados para modelar en el plano de acción, placas y vigas cortas.
  - Elementos de deformación plana son usados para modelar paredes de contención y largos diques.
  - Elementos axisimétricos son utilizados para modelar estructuras rotacionalmente simétricas sobre uno de los ejes y cargado simétrica o asimétricamente sobre el mismo eje.

Algunos problemas concretos tienen la posibilidad de ser modelados con más de un tipo de análisis. Los resultados que se esperan obtener también sirven para seleccionar un tipo de elemento u otro.

## **ELEMENTOS FINITOS EN SOLIDWORKS**

Este software es una herramienta, diseñada para validar el diseño, que simula las piezas y los ensamblajes por análisis de elementos finitos. Ofrece la posibilidad de obtener el comportamiento mecánico y térmico de un diseño sin tener que llevar a cabo un prototipo real. Este software permite modificar la geometría del modelo tras un primer análisis y luego volver a analizarlo para observar los nuevos resultados de los cambios.

Este programa ofrece la posibilidad de realizar los siguientes estudios:

- Análisis estático
- Análisis de frecuencia
- Análisis de pandeo
- Análisis térmico
- Análisis de fatiga
- Análisis de recipientes a presión

El proceso normal de validación de una pieza con SolidWorks sería el siguiente:

1. Modelado del diseño en tres dimensiones
2. Mallado del modelo creado
3. Imposición de fuerzas y restricciones en el modelo
4. Post-procesado, en este paso se realiza la simulación del método de elementos finitos obteniendo el resultado de las tensiones, desplazamientos y de las deformaciones unitarias.

En el caso de no haber quedado satisfecho con los resultados obtenidos en el último paso se realizaría un rediseño en tres dimensiones del modelo y se repetiría el proceso entero de nuevo. Esto se volvería a hacer tantas veces como fuese necesario hasta conseguir los resultados positivos esperados.

## *b) Análisis estático*

El análisis estático ofrece las siguientes ventajas:

- Ofrece la posibilidad de simular los desplazamientos, fuerzas de reacción, tensiones y deformaciones unitarias que se han producido en un modelo tridimensional bajo unas condiciones de contorno previamente predefinidas.
- Ofrece la posibilidad de evaluar el factor de seguridad, pudiendo rediseñar el modelo en las zonas donde la tensión sea muy elevada.
- Ofrece la posibilidad de llevar a cabo diseños sin tener que estar realizando prototipos físicos ni otras pruebas de campo.

El análisis estático hace dos suposiciones:

1. Toma la realización del ensayo en condiciones estáticas, los esfuerzos se aplican de manera progresiva hasta llegar al valor máximo establecido. No se tienen en cuenta ni las fuerzas inerciales ni el amortiguamiento. Cuando se disponga de cargas dinámicas o cambiantes en el tiempo se debe emplear análisis dinámico.
2. Se toma el ensayo como lineal en el que las deformaciones resultantes son proporcionales a los esfuerzos aplicados. La respuesta ofrecida por el modelo que se encuentra sometido a una tensión estática es lineal, siendo las deformaciones unitarias y las tensiones, proporcionales a las cargas aplicadas.

Este tipo de análisis ofrece la posibilidad de saber cómo se deforma una pieza sometida a unas ciertas condiciones de carga conocidas, ya que tiene en cuenta las propiedades mecánicas de la misma. También ofrece la posibilidad de saber si llega a fallar la pieza y por qué sitio empezaría a hacerlo. Las propiedades mecánicas principales que se deben tener en cuenta en este tipo de análisis son:

- Densidad: Varía en función de la temperatura. Se expresa en  $\text{kg/m}^3$  o  $\text{g/cm}^3$
- Tensión: Define la intensidad de las fuerzas aplicadas sobre la pieza por unidad de sección.
- Tensión de Von Mises: Se define como la tensión equivalente que se aplica sobre los elementos diferenciales. Esta tensión es comparada con la tensión límite del material.
- Tensiones principales: Se definen como las tres componentes principales de la tensión que son a su vez normales a las caras de un cubo. Estas componentes definen el estado tensional de la pieza.

- Deformación unitaria: Se define como la proporción entre el cambio de la longitud del modelo y la longitud inicial del mismo. Esta deformación es adimensional, es decir, no tiene unidades.
- Módulo de elasticidad: Se define como la relación entre la tensión la deformación cuando esta es solamente en la zona elástica. Es una propiedad característica de cada material y también es denominada Módulo de Young. La deformación sufrida es elástica y cuando se retira la carga aplicada, el material vuelve a su estado inicial anterior a la aplicación del esfuerzo.
- Límite elástico: Se trata de la tensión máxima que es capaz de soportar un material sin llegar a conseguir una deformación permanente.
- Tensión límite: Es el valor de la carga para el cual el material produce el fallo.
- Módulo de Poisson: Se define como una relación negativa de las deformaciones laterales y axiales resultantes de la aplicación de un esfuerzo axial en el proceso de deformación elástica. El valor que suele adquirir en metales dista entre 0,25 y 0,35.
- Factor de seguridad: Se trata de un valor que siempre se define cuando se trata del diseño de cualquier pieza sometida a ciertas cargas. Este valor ofrece la posibilidad de sobredimensionar el modelo para que no produzca el fallo del mismo. Suele tener un valor comprendido entre 1 y 4.
- Módulo cortante: Se define como el resultado entre la tensión de cortadura de un cierto plano dividido por la deformación de cortadura unitaria.
- Coefficiente de dilatación térmica: Se trata de la variación longitudinal y volumétrica que sufre una pieza como consecuencia de la separación de sus moléculas causada por un incremento de temperatura.
- Conductividad térmica: Se trata de una medida que relaciona la cantidad de calor transferido por unidad temporal a través de una sección cuando se da un gradiente de temperatura.
- Capacidad calorífica: Se trata de la energía necesaria para subir un grado centígrado la temperatura de un mol de material.
- Calor específico: Se trata de la energía requerida para aumentar en un grado centígrado la temperatura de una masa particular de un material.

### *c) Sujeciones*

Las sujeciones ofrecen la posibilidad de definir la manera en la cual el modelo del objeto o ensamblaje va a comportarse, en lo que a sus desplazamientos se refiere, tras haber sufrido alguna carga que actúe sobre él.

Las sujeciones son un elemento requerido en el análisis para así impedir que los modelos se desplacen o roten tras aplicarles los esfuerzos. SolidWorks posee dos tipos de sujeciones diferentes, estos son la estándar y la avanzada. Estos dos tipos de sujeciones se subdividen a su vez en otros tipos.

#### **SUJECIONES ESTÁNDAR**

- Geometría fija

Este modelo de sujeción establece todos los grados de libertad de traslación como cero en los cuerpos elegidos. Anula cualquier desplazamiento posible en los cuerpos escogidos. En los modelos de vaciado y en vigas se inhabilitan las rotaciones y los desplazamientos, mientras que en las cabezas de armadura el grado de libertad de traslación es cero.

- Inamovible

Este modelo de sujeción hace que todos los grados de traslación del objeto sean cero. Es de la misma manera para vaciados, vigas y cabezas de armadura. No se usa ninguna referencia de geometría.

- Rodillo/Control deslizante

La limitación deja el libre movimiento de una cara plana sobre su plano pero no permite el movimiento perpendicular o normal de este. El objeto bajo cualquier tipo de carga puede conseguir deformarse.

- Bisagra fija

Esta limitación tiene mucha utilidad para concretar que las caras cilíndricas de una pieza únicamente puedan rotar sobre su mismo eje. La limitación de movimiento se basa en anular las componentes axiales y las radiales sobre la cara de forma cilíndrica de la pieza.



- Simetría

Esta limitación es muy utilizada en la mayoría de los modelos con geometría simétrica para así simplificar y ahorrar recursos. Se puede trabajar solo con una de las mitades del modelo para así reducir a la mitad los elementos que hay que mallar y tardar menor tiempo en obtener los resultados.

La asignación de este modelo sólo se puede llevar a cabo en piezas en las que los restos de cargas y de restricciones son perfectamente simétricas, si esto no es así no se podrá aplicar.

## SUJECCIONES AVANZADAS

- Simetría circular

Es una sujeción similar a la simetría simple pero que ofrece la posibilidad de simplificar diseños que han sido realizados con el uso de matrices polares o circulares.

Para poder hacer una limitación se debe elegir el segmento que atañe a la matriz polar que representa el modelo. Se consigue una disminución del tiempo de cálculo y un aumento de la calidad de los resultados con la utilización de esta simetría.

- Utilización de geometría de referencia

Esta tipología ofrece la posibilidad de realizar limitaciones de movimiento mediante el uso de geometría de referencia, esta geometría de referencia puede ser un plano, un eje, una cara o una arista. Esta fijación limita el movimiento del plano, de la cara o de la arista en las direcciones escogidas pero posibilita el movimiento libre en las otras direcciones.

- Plano: Este tipo se basa en la elección de un plano como referencia y alguna de las caras del modelo.
- Eje: La fijación se genera eligiendo un cierto eje que es utilizado como referencia y una cierta cara a la cual se le permiten algunas traslaciones axiales, radiales y circunferenciales.

- Cara del modelo: Se escoge una cierta cara de la pieza y se utiliza como referencia de la fijación. Se fija el movimiento de traslación en las direcciones axiales normales a dicha cara.
- Arista: Se basa en la utilización de la arista de forma rectilínea de la pieza como referencia en la realización de la fijación. La cara restringida de la pieza puede desplazarse 1 mm a lo largo de la longitud de la arista.
- Sobre caras:
  - Planas: Ofrece la posibilidad de limitar el movimiento de una cierta cara elegida respecto de sus propias direcciones.
  - Cilíndricas: Ofrece la posibilidad de limitar el movimiento de una cierta cara cilíndrica elegida respecto de su mismo eje en las direcciones axial, radial y circunferencial.
  - Esféricas: Ofrece la posibilidad de limitar el movimiento de una cierta cara esférica de un modelo elegido respecto a la longitud de su propio centro, las direcciones radiales y la latitud.

#### *d) Cargas*

Las cargas externas y las restricciones tienen un papel fundamental a la hora de definir el entorno de servicio del modelo, ya que los resultados que se obtienen del ensayo son totalmente dependientes de estos. Las cargas y restricciones son aplicadas a partes geométricas en forma de operaciones que son asociadas de manera completa a la geometría y ajustadas de manera automática a cambios en la misma.

Los existentes tipos de carga que se pueden definir en un ensayo estático son:

- Fuerza

Se aplican fuerzas, momentos y/o torsiones en las aristas, caras, puntos de referencia o vértices de la pieza. Se pueden crear distribuciones tanto de fuerzas uniformes como de fuerzas que no lo son.

- Torsión

Se puede aplicar torsión en las aristas, caras, puntos de referencia y/o vértices del modelo ensayado.

- Presión

Ofrece la posibilidad de aplicar una presión uniforme o variable en las caras de la pieza a analizar. Esta presión se puede utilizar a la hora de realizar análisis estáticos, de frecuencia y de pandeo. Tipos de presión:

- Normal a la cara escogida
- Establecida mediante la selección de una entidad de referencia
- Establecida mediante la selección de una cara, arista, plano o eje para la dirección

- Gravedad

Se basa en la colocación de aceleraciones lineales a las piezas. Ofrece la posibilidad de ser definida en cualquier dirección por un sistema de coordenadas, una arista, una cara plana o cualquier plano de referencia.

- Fuerza centrífuga

Se puede colocar una carga centrífuga a un modelo o a un ensamblaje con la definición de la velocidad y la aceleración angular. Estas cargas también dependen de la densidad de la masa del modelo. Esta fuerza se puede utilizar a la hora de realizar análisis estáticos, de frecuencia, de pandeo o no lineales.

- Carga de apoyo en rodamientos

Ofrece la posibilidad de definir las cargas que se fijan en los rodamientos, para poder usarlas se deben escoger caras cilíndricas y de contacto dónde está montado el rodamiento. Las fuerzas resultantes generan una presión no uniforme en la zona de contacto. El software predetermina una distribución sinusoidal o parabólica.

- Masa distribuida

Este tipo de carga es utilizada para determinar la masa que una o varias partes pueden realizar sobre las caras escogidas de otro sin la necesidad de tener que incluirse en el modelo, sino solamente el efecto de dicha masa cuando esta pueda plantearse como uniformemente distribuida en las caras escogidas.

## *e) Contactos y conexiones*

### **CONTACTOS**

Al realizar un estudio en el que intervienen varias piezas que componen un ensamblaje hay que determinar las condiciones de contacto para así imponer la manera en la cual se va a llevar a cabo la interacción entre los contornos de cada pieza.

La determinación de estos contactos es algo necesario en los estudios estáticos. Cuando se realice un cambio en las condiciones de contacto se requiere que se vuelva a generar el mallado de la pieza o el conjunto.

La configuración de contacto determina la interacción entre contornos de modelos que están en contacto desde el momento inicial o que entran en contacto durante la aplicación del esfuerzo para el análisis.

El programa permite escoger entre seleccionar a mano los conjuntos de contactos, pudiendo seleccionar también el tipo de fricción, o la realización de una búsqueda automática de los conjuntos de contactos. Independientemente de esto se pueden realizar ensambles de caras de diferentes piezas que conforman el conjunto que se encuentran en contacto y caras que no se llegan a tocar.

Los tipos de contacto diferenciados son:

- Sin penetración
- Unión rígida
- Ajuste por contracción
- Con penetración permitida
- Pared virtual

Las propiedades de los contactos son:

- Fricción: Se da en casos de estudios de caída, no lineales y estáticos sin penetración y también en estudios estáticos y no lineales de contacto ajustados por contracción. Se debe de definir el coeficiente de fricción.
- Separación o espacio libre: Se da en el caso de nodo a superficie y también de superficie a superficie para el contacto sin penetración y pared virtual sólo en estudios estáticos. Hay que definir la condición para ignorar distancias.

## CONTACTOS ENTRE COMPONENTES

Se usa para elegir las partes y estructurar la condición de contacto predefinida para las áreas que tienen en común las partes escogidas, entre ellas o con otras partes.

Se puede aplicar un conjunto de condiciones de contacto para invalidar la estructuración de contacto global añadiendo contacto entre partes y grupos de contactos globales. Cuando se realiza un cambio o se añade una condición de contacto hay que llevar a cabo nuevamente el mallado del objeto.

Los contactos entre conectores pueden clasificarse en:

- Sin penetración: No permiten que interfieran las diferentes partes que conforman el modelo, pero si dejan realizar separaciones.
- Unión rígida: Se realiza una unión rígida entre las diferentes partes que conforman el modelo.
- Con penetración permitida: Las diferentes partes que conforman el modelo tienen la posibilidad de penetrar entre ellas mientras se realiza la simulación.
- Contacto global: Determina el modelo en el que va a estar configurado el modelo en cuanto a la forma en la cual se van a estructurar las caras en contacto en el ensamblaje simulado.

## CONECTORES

Se define al conector como un mecanismo que teniendo forma de identidad, ya sea una arista o una cara o un vértice, está conectada a otra identidad o a tierra. Su uso es muy útil ya que simplifica el modelado debido a que normalmente ofrece la posibilidad de simular la actuación que queremos sin necesidad de generar geometría minuciosa o fijar condiciones de contacto.

Los conectores se clasifican en:

- Rígido: Determina una articulación rígida entre caras de dos cuerpos diferentes.

- Perno: Determina una conexión de perno de dos partes o de una parte con la tierra.
- Pasador: Realiza la conexión entre las caras cilíndricas de dos sólidos.
- Muelle: Determina un resorte que únicamente soporta la tensión como si de un cable se tratara, es decir, únicamente soporta compresión o tracción.
- Soporte elástico: Define un cimiento elástico de las caras escogidas de un objeto o ensamblaje y la tierra.
- Vincular: Define la vinculación de dos lugares cualesquiera en el modelo mediante una barra rígida con bisagras en los dos extremos.
- Rodamiento: Define la conexión del rodamiento entre un eje y un receptáculo.
- Soldadura de arista: Realiza una estimación del tamaño necesario de una correcta soldadura que una pares de componentes metálicos.
- Soldadura por puntos: Define la conexión entre varias chapas, fabricadas en metal, de pequeño grosor que se encuentren superpuestas en zonas de poco tamaño sin necesidad de un material para rellenar.

### III. Diseño del chasis

El diseño del chasis es un proceso largo y costoso, ya que hay que conseguir coordinar muchos factores para poder realizar un bastidor adecuado. Este debe cumplir con todos los requisitos necesarios para garantizar un buen comportamiento sin tener un coste excesivo, y también que se pueda ensamblar de manera adecuada con el resto de componentes de la motocicleta.

En este caso de estudio en particular se cuenta con la ventaja de que se está llevando a cabo el diseño de un chasis destinado a ser usado en circuito, por lo que no es necesario homologarlo ni acogerse a ninguna legislación ni marco legal. Esto es así ya que no circulará bajo ningún concepto por la vía pública.

Si es necesario que cumpla ciertos requisitos para poder competir en un circuito de motocross, estos requerimientos están fijados en la normativa sobre competición de la Federación Española de Motocicletas de Motocross. En este caso concreto que se lleva a cabo en el proyecto, al estar modificando una motocicleta, que ya cumplía con la normativa, sin cambiar las medidas de la motocicleta ni el motor, la motocicleta modificada seguirá cumpliendo perfectamente con todos los aspectos exigidos por la federación.

#### 1. Chasis original

Este proyecto parte de la motocicleta de marca Honda modelo Crf 250 versión 2016. Este modelo lleva un chasis de doble viga perimetral desdoblado fabricado en aluminio. Dicho bastidor ha sido mejorado a lo largo de los años del modelo por medio de la observación de los resultados obtenidos en el mismo modelo pero en versiones anteriores.

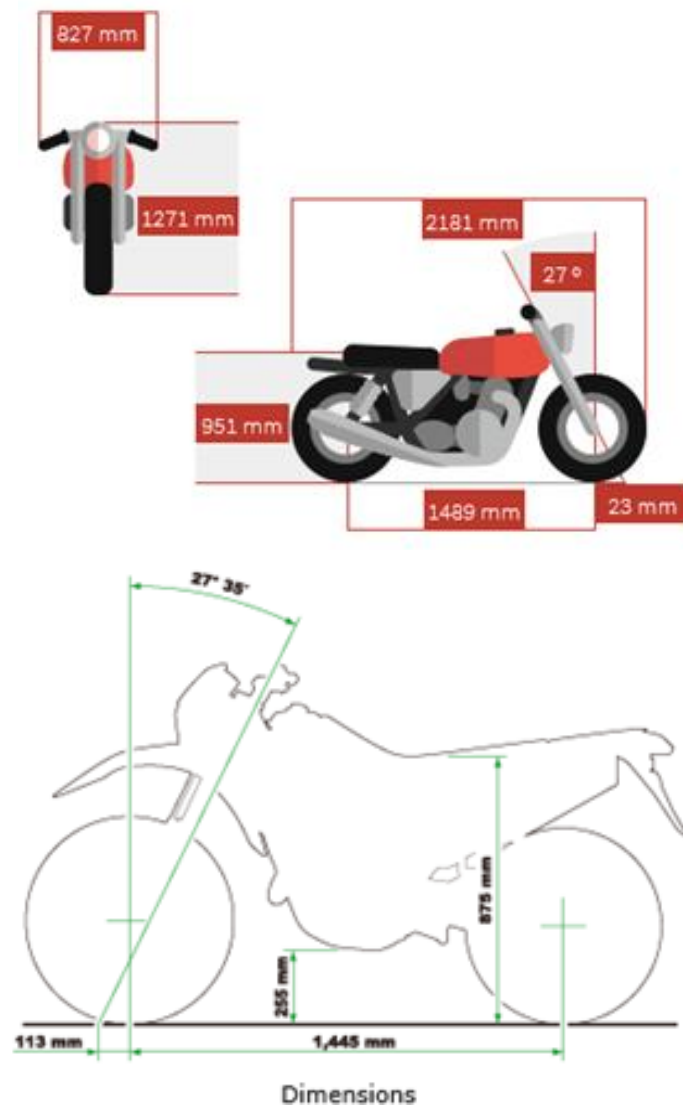


**Figura 60.** Chasis original de la Honda Crf 250



Esta motocicleta tiene las siguientes medidas que son de interés para la construcción del nuevo modelo de bastidor:

- Largo motocicleta: 2181 mm
- Alto motocicleta: 1271 mm
- Ancho motocicleta: 827 mm
- Distancia entre ejes: 1489 mm
- Altura del asiento: 951 mm
- Altura libre: 322 mm
- Ángulo de lanzamiento:  $27,23^\circ$
- Avance: 117 mm
- Peso: 105,6 kg



**Figura 61.** Medidas originales de la Honda Crf 250

## 2. Requerimientos estructurales

Generalmente se piensa que al realizar el diseño de un chasis, que sea acorde a unas ciertas necesidades, lo más problemático es buscar el compromiso entre todos los parámetros geométricos. Esto es cierto hasta cierto punto, ya que si el bastidor diseñado, teniendo en cuenta los parámetros geométricos no cumple con los requerimientos estructurales a tener en cuenta a la hora de diseñar un chasis, habrá sido en vano el trabajo realizado para encontrar dicho compromiso. Estos requerimientos estructurales del bastidor son los que proporcionan la rigidez al mismo.

A la hora de diseñar el chasis hay que tener muy presente el uso para el cual va a estar destinada la motocicleta y el motor que se quiere alojar en ella. Entonces independientemente de la geometría del chasis, se tienen en cuenta otros parámetros como son la rigidez y la ligereza del mismo.

El bastidor está definido como el elemento primordial de la motocicleta en cuanto a estructura se refiere, ya que une mediante la pipa de dirección el conjunto delantero con el basculante soportando todos los elementos mecánicos, manteniendo la geometría y el reparto de pesos de manera equilibrada.

La pipa de la dirección y la zona del eje del basculante son las partes de la motocicleta que mayores esfuerzos soportan, entonces por este motivo son las zonas más reforzadas del chasis.

Durante el funcionamiento de una motocicleta surgen diversas fuentes de flexión, fenómeno que no es beneficioso para el bastidor. Entonces se deben minimizar si se desea que la motocicleta diseñada tenga el comportamiento esperado.

Cabe destacar por su importancia el alineamiento entre los planos medios de las ruedas y el eje de la dirección, ya que si no se mantuviese este alineamiento, la estabilidad direccional sufriría y se tendería a mover la dirección [1].

El más importante en este ámbito del alineamiento es el tren delantero, en el cuál este es suministrado en gran parte por la rigidez lateral de la horquilla y de la rueda. Los trenes delanteros tipo hub-centre llevan una gran delantera en este aspecto, ya que sólo la rueda es una posible fuente de flexión para desalinear el eje de la dirección. En cambio, las horquillas telescópicas soportadas por una pipa de dirección normal carecen de rigidez en un plano longitudinal, esto sólo influiría en la frenada, cuando construcciones poco rígidas pueden tener como resultado rebotes en la rueda y temblores.

Al realizar una conducción estándar, la rigidez torsional entre el manillar y el eje de la rueda no suele generar fallos. En motocicletas de tipo trial o motocross es necesario aplicar grandes momentos de dirección para salir de las roderas.

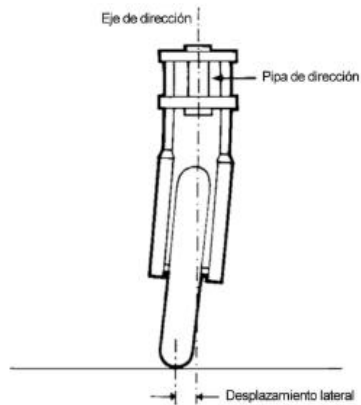


Fig. 3.25 Desplazamiento lateral debido a la flexión de la horquilla y la rueda.

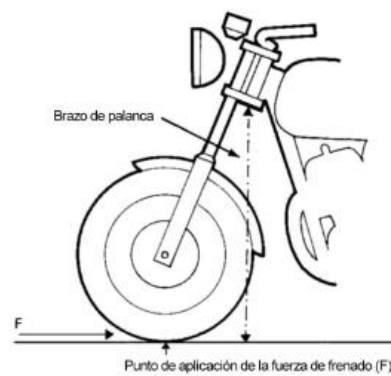


Fig. 3.26 El gran brazo de palanca causa elevados momentos flectores en las barras de la horquilla y en la pipa de dirección, lo que puede dar lugar a vibraciones y saltos de rueda.

**Figura 62. Problemas estructurales de un chasis [1]**

Manteniendo alineada la rueda trasera con el eje de dirección conseguimos la rigidez lateral y torsional del chasis y del basculante, y también la rigidez lateral en la rueda.

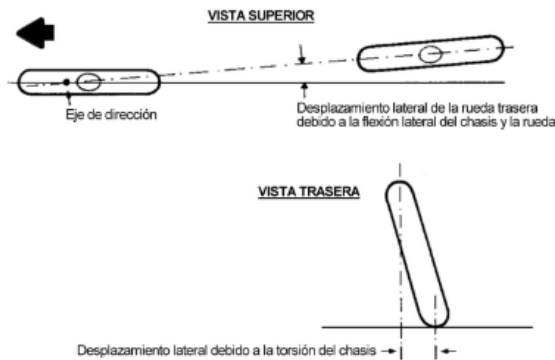


Fig. 3.27 Desplazamiento lateral de la rueda trasera debido a la flexión lateral y torsional del chasis.

**Figura 63. Desplazamiento lateral de la rueda trasera [1]**

Otro factor importante a tener en cuenta a la hora de diseñar un bastidor rígido es la rigidez lateral del subchasis que sustenta el asiento. El conductor del vehículo recepta una parte importante de la información del comportamiento de la motocicleta a través de las partes de su cuerpo en contacto con el asiento. De esta manera, si el asiento se mueve de manera individual con respecto al chasis, el conductor recibirá información errónea. En múltiples situaciones malos comportamientos teóricos de una motocicleta se han superado aumentando la rigidez del soporte del asiento.

### 3. Decisiones estructurales

El esqueleto de una motocicleta debe mantener los parámetros básicos que influyen en su funcionamiento dentro de unos rangos de valores correctos ante cualquier situación que se pudiera dar durante su utilización. Esto debe combinarse con la búsqueda de una estructura lo más ligera posible y con un tiempo de vida lo más duradero posible.

#### **FATIGA**

El fallo de la estructura suele producirse generalmente debido a la aplicación de una carga excesiva, que produzca la rotura o una deformación permanente, o debido a fatiga, que conduzca al chasis a la rotura tras un cierto número de ciclos de carga.

En los materiales metálicos la fatiga es un tema muy complejo y de gran importancia, ya que es en múltiples ocasiones lo que produce el fallo de la estructura cuando esta está únicamente expuesta a cargas previstas. Resulta esencial en un buen diseño asegurar que el fallo por fatiga se producirá tiempo después de la vida esperada para la que ha sido diseñada la motocicleta.

El fenómeno de la fatiga se da cuando se somete la pieza a ciclos de carga y de descarga. En la práctica, hay que conocer la tensión que sufre la estructura para saber así el número de ciclos con el que se producirá el fallo de la estructura. Cada material metálico tiene unas características de fatiga diferentes, un ejemplo de esto son los metales a los cuales se les puede someter a un número infinito de ciclos de carga, siendo el valor de esta carga inferior a un determinado valor, sin que nunca lleguen a fallar.

Entonces conviene siempre tener muy presente el tema de la fatiga a la hora de diseñar un bastidor de motocicleta. Hay que tener mucha precaución si se quiere diseñar un chasis de aluminio, como se hace comúnmente, ya que al estar realizado en este material en algún momento de su vida fallará a fatiga.

#### **EFICIENCIA ESTRUCTURAL**

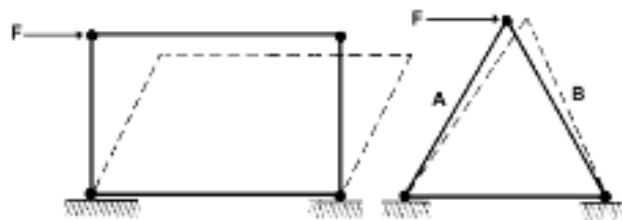
Si las partes del bastidor han sido diseñadas para ser lo suficientemente rígidas y el diseño de detalle ha sido realizado de una manera correcta, la resistencia no será un inconveniente generalmente. Una buena forma de saber si la eficiencia de un bastidor es la adecuada viene dada por la relación rigidez / peso. El coste de los materiales está

estrechamente relacionado con el peso de los mismos, y debido a esto muchos fabricantes hablan de eficiencia estructural como la relación que hay entre rigidez / coste. Hay dos maneras de conseguir una buena eficiencia estructural de este tipo:

- Utilizando una gran cantidad de tubos de geometría recta y pequeño diámetro colocados formando un chasis basado en la triangulación.
- Utilizando una pequeña cantidad de tubos de un gran diámetro confiando en su rigidez inherente a torsión y a flexión.

## TRIANGULACIÓN

Para poder entender los efectos de la triangulación lo primero que se va a realizar es mostrar las siguientes estructuras básicas [1]:

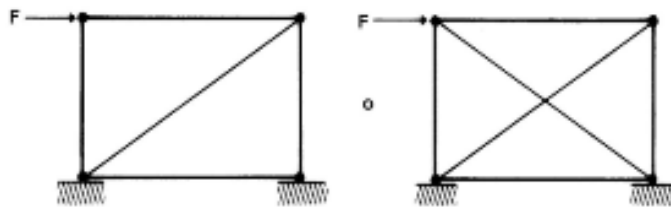


**Figura 64.** Estructuras simples usadas para explicar triangulación [1]

Cuando se somete a las estructuras a una fuerza como la que aparece en la figura anterior y sus bases se encuentran fijas, sucederá lo siguiente. En la pieza de cuatro lados se distorsionará su forma llegando a alcanzar una apariencia parecida a la de un rombo mientras que la forma triangular únicamente variará su forma si se produjera una varianza en la longitud de alguno de sus lados. La estructura con forma de cuadrilátero no se llega a deshacer debido a la resistencia a flexión en las puntas de las barras.

El bastidor de una motocicleta es una estructura práctica, y como tal se debería diseñar de manera que incorporase triángulos colocados de manera inteligente consiguiendo una estructura muy eficiente. Si se realizara una conversión mental de todas las conexiones de una estructura en articuladas se observaría si esta está totalmente triangulada o no lo está. Esto se observa al realizar la conversión mental de la siguiente manera, si al aplicarle una fuerza la estructura permanece como previamente a la aplicación de la fuerza está completamente triangulada, y se puede decir que es una estructura completa. Si por el contrario la forma de la estructura se distorsiona, entonces no tiene mucha utilidad como estructura y se le conoce como mecanismo.

Si se le incorporan una o dos barras en posición diagonal como refuerzo a la estructura con forma de cuadrilátero se aporta a la estructura una gran rigidez. Si se incorporan dos diagonales estas pueden ser cables o barras de pequeña sección, ya que una de ellas en todo momento tendrá que soportar una tracción bajo cualquier esfuerzo que tenga aplicado la estructura y la otra estará en tensión completando la estructura. En cambio si incorporamos una única barra debe tener una sección necesaria para que aguante los esfuerzos de compresión que surgirán al cambiar el sentido de aplicación de la carga.



**Figura 65.** Estructuras articuladas sometidas a una fuerza [1]

Los bastidores de motocicletas que tienen un diseño basado en la utilización de estructuras triangulares unidas mediante tornillos es un caso muy similar al ejemplo de una estructura articulada en las uniones. Estos diseños presentan ventajas como la facilidad de las reparaciones, pero también presentan desventajas como el movimiento que se puede producir en las uniones, que acabaría con las ventajas de rigidez que proporciona la triangulación. Otra desventaja, aunque de menor importancia pero que también repercute, es que el peso de los tornillos y las tuercas que realizan las uniones es superior al peso que proporciona la unión por medio de soldadura.

Es más común la realización de diseños basados en estructuras trianguladas unidas mediante soldadura, pero estos diseños también presentan ciertas desventajas. Un gran inconveniente es que no resulta sencillo asegurar que todas las fuerzas que alcanzan cada barra las hacen trabajar a tracción o a compresión. El ancho de pared de las barras induce un descentramiento físico que produce un distanciamiento de una forma triangular perfecta, lo que lleva a que se produzcan momentos flectores que en ocasiones no se pueden calcular. Además la realización de la soldadura puede ocasionar tensiones residuales en el bastidor, y las uniones en sí pueden originar concentradores de tensiones.

Como conclusión de los problemas contados en este apartado, se obtiene que se debe realizar diseños de bastidores con un alto coeficiente de seguridad para así evitar fallos por fatiga en la estructura diseñada.

## SECCIÓN DE UN TUBO

La rigidez a torsión y la rigidez a flexión no son únicamente función de la sección transversal y del módulo, si no que son función también del momento de inercia, esto es una ayuda para la utilización eficiente de materiales ligeros.

A la hora de diseñar el bastidor de una motocicleta lo más común es realizarlo utilizando tubos de sección circular en vez de barras macizas. Para lograr los mismos valores de rigidez a flexión y de rigidez a torsión utilizando un tubo de menor densidad se puede usar el mismo diámetro pero aumentando el espesor del tubo, o bien usar el mismo espesor de pared del tubo pero incrementando el diámetro del mismo.

Entonces se puede concluir con lo siguiente, la mejor manera de utilizar materiales que tengan una baja densidad se basa en diseñar secciones con el mayor tamaño posible y que conserven también un espesor de pared correcto [5].



## 4. Elección del material

La correcta elección del material con el cual se va a fabricar el chasis es un factor que condicionará de manera decisiva el comportamiento de la futura motocicleta, ya que si se escoge un material que no sea adecuado no cumplirá las expectativas de uso que se desean alcanzar.

Durante esta elección del material se debe tener en cuenta las características que va a proporcionar cada material como son la rigidez, la resistencia, la resistencia a fatiga, la densidad y la ductilidad. Hay que tener presente también al realizar la elección del material de fabricación la complejidad de fabricación, de mecanización y de unión de cada material. Todos estos factores hay que combinarlos con el factor económico, ya que en función del material escogido habrá unos gastos diferentes asociados al coste del material, de su unión y de su mecanización.

Las características que se desea que posea el material de construcción se escogen en función del uso para el que vaya a estar destinada la motocicleta y del grado de exigencia que se quiere obtener de la misma.

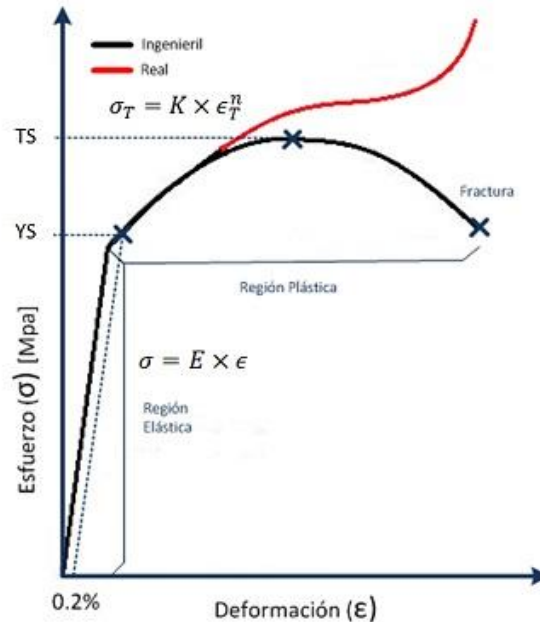
### *a) Introducción a los materiales*

La tensión se utiliza para cuantificar la resistencia de la estructura. La tensión es la fuerza aplicada en una sección determinada del material. La tensión de rotura es característica de cada material y es importante conocer qué valor tiene, ya que es un valor determinante a la hora de escoger un material.

Otro factor determinante a la hora de escoger material es el límite elástico, este factor también cuantifica la resistencia del chasis. El límite elástico se define como la relación entre la tensión aplicada y la deformación producida por dicha tensión. Si se aplica una fuerza por debajo del límite elástico se producirá una deformación mientras se aplica la carga, pero al quitar la carga la pieza volverá a su estado previo a la aplicación de la carga. Esto es lo que se denomina un fenómeno de deformación elástica. Si se aplicase una fuerza de valor superior al límite elástico se podría producir desde un cierto grado de deformación permanente hasta una rotura de la estructura.

En función de la ductilidad del material habrá materiales en los cuales haya una amplia zona de deformación elástica y otros que prácticamente carezcan de esta, produciendo una rotura directamente. Cuando un material sufre una gran deformación hasta la rotura se habla de un material dúctil, cuando ocurre lo contrario se habla de un material frágil.

Generalmente de manera desafortunada la fragilidad de los materiales aumenta en función del aumento de la resistencia.



**Figura 66.** Curva tensión-deformación de un material dúctil

La relación entre la deformación unitaria y la deformación transversal es el Módulo de Young, este debe tener un valor comprendido de entre 0 y 0,5. Para metales este tiene un valor medio de 0,33 y en el caso de una goma 0,5.

Hay que tener en cuenta que después de realizarle una soldadura a un cierto material, este puede perder un determinado grado de resistencia.

A la hora de diseñar un bastidor para una motocicleta los materiales que resultan interesantes son los dúctiles, ya que serían capaces de aguantar un nivel de carga superior al normal sin terminar en rotura.

Entonces la elección del material y del tratamiento térmico que este va a recibir debe ser una decisión en la cual se tengan en cuenta todos los factores y se elija un material que cumpla con todos los requerimientos para lograr un comportamiento adecuado.

Los materiales más utilizados en la construcción de un chasis son:

- Acero
- Aluminio
- Titanio
- Fibra de carbono
- Magnesio
- Cromo-Molibdeno

## *b) Propiedades de los materiales más aptos*

A continuación podemos observar una tabla a modo de ejemplo en la que se comparan las propiedades de los materiales más típicos:

Material	Tensión de rotura Kgf/mm <sup>2</sup>	Gravedad específica	Módulo de Young x 10 <sup>4</sup> Kgf/mm <sup>2</sup>	Rigidez relativa
Fundición gris	16 - 22	7.3	1.27	0.65
Acero inoxidable/estructural	47 - 63	7.8	2.1	1.00
Tubo Reynolds 531/4130	78	7.8	2.1	1.00
Aleaciones de Aluminio	17 - 63	2.7	0.7	0.96
Aleaciones de magnesio	19 - 32	1.7	0.44	0.96
Aleaciones de titanio	47 - 126	4.4	1.2	1.01
Nylon	8	1.1	0.14 - 0.28	0.47 - 0.95
PVC	6	1.4	0.025 - 0.042	0.07 - 0.11
PTFE (Teflon)	1.3	2.2	0.035 - 0.042	0.06 - 0.07
Fibra de vidrio	16 - 35	1.7	0.07 - 0.2	0.15 - 0.44
Fibra de carbono (en la dirección de las fibras)	140	1.6	2.2	5.11

**Tabla 1.** Propiedades típicas de algunos materiales [1]

La gravedad específica compara la densidad de cualquier material con la del agua. Los valores de la tabla son orientativos, ya que por ejemplo la tensión de rotura puede tener valores muy diferentes en función de la aleación que sea y de los tratamientos térmicos y mecánicos que hayan recibido [1].

La rigidez relativa se refiere a una relación entre el Módulo de Young y la gravedad específica con respecto a la del acero. Entonces la rigidez relativa es la medida de rigidez por unidad de peso.

En la tabla se observa que el aluminio, a igualdad de peso, tiene la misma tensión de rotura que otros materiales como son el titanio, acero o magnesio. Cabe destacar que esta comparación sólo es verdadera cuando hablamos de tensiones de tracción o compresión.

La forma más eficiente de usar materiales ligeros consiste en usar materiales de gran sección manteniendo el espesor de pared adecuado. Esto es lo que se suele llevar a cabo con materiales como el aluminio, cuya densidad supone el 33% de la densidad del acero.

- Acero

El acero es una aleación formada por hierro y carbono, en la cual el carbono presente no es inferior al 0,03% ni superior al 2% del porcentaje en peso. Si se superase este porcentaje de carbono se obtendrían fundiciones o aleaciones con una composición muy pequeña de carbono que se conocen como hierro o hierro dulce.

La diferencia del hierro o hierro dulce con el acero radica principalmente en la ductilidad obtenida en el material, ya que el acero por su ductilidad es deformable en caliente de manera sencilla mediante forja, laminación o extrusión. En cambio las fundiciones son fabricadas normalmente por moldeo. Al acero también se le ha denominado por sus características hierro forjable o, si es obtenido por fundición, hierro colado.

También cabe destacar que el acero se distingue del resto porque tiene la posibilidad de templarse obteniendo una muy buena dureza, a este estado conseguido del acero se le conoce como acritud. En cambio el hierro dulce no se puede endurecer con este proceso.

Anteriormente se ha centrado la definición en los aceros al carbono, en los cuales es carbono es el único aleante presente o si hay más aleantes formando el material no están en una cantidad suficiente mente grande para que su presencia produzca cambios en las propiedades de la aleación. Pero realmente existe diversidad de aceros que toman diferentes nomenclaturas en función del aleante que predomina en la formación del material o de alguna propiedad característica que reciban, algunos ejemplos de esto son:

- Aceros de cementación : Pueden recibir tratamientos térmicos
- Aceros inoxidables : Poseen propiedades exaltadas
- Aceros estructurales : Disponen de buenas propiedades para ciertos usos
- Aceros al silicio : Predomina el silicio como aleante

En general estas aleaciones que tienen como base el hierro se incluyen dentro del nombre común de aceros especiales. Es por este motivo por lo que se ha acogido como aceros comunes o al carbono, ya que al ser los primeros obtenidos y los más utilizados sentaron las bases para la obtención del resto.

El acero como material utilizado en la construcción de ciertos tipos de chasis es muy común. Esto se debe a su asequible coste de adquisición, a la disponibilidad de buenas y desarrolladas técnicas de unión y mecanización, a su elevado Módulo de Young que proporciona una buena rigidez y a unos buenos resultados que proporciona después de la soldadura.

- Aluminio

Este material destaca por ser ligero, por su buena conductividad eléctrica, por su resistencia a la corrosión y por su pequeño punto de fusión. Estas cualidades que tiene le ofrecen un amplio abanico de posibles usos entre las que destaca la aviación.

El aluminio también plantea el gran inconveniente de que necesita una alta cantidad de energía para su obtención, este factor hace más complicado su aplicación. Dicha dificultad se ve contrarrestado por su facilidad y pequeño coste de reciclado, la estacionalidad de su coste y su prolongada vida útil.

Las características de este material son la ligereza, la blandura, la resistencia y su aspecto grisáceo brillante. Tiene una densidad que se puede aproximar a una tercera parte de la de materiales como el cobre o el acero. Es un material dúctil y maleable, cualidades que lo hacen idóneo para el mecanizado y la fundición.

El aluminio posee un alto calor de oxidación, lo que produce de manera rápida una capa superficial de poco espesor de óxido impermeable y adherente que paraliza el proceso de oxidación suministrándole al material una durabilidad y una alta resistencia contra la corrosión.

Las mejores aleaciones de Aluminio en cuanto a lo que soldadura se refiere son las que están compuestas con Magnesio o Manganeseo. Hay en cambio otra aleación, la Al-Zn-Mg que es muy utilizada aunque tiene un procedimiento de soldadura complicado, pero tiene la ventaja de tener una recuperación que llega hasta el 90% en la zona alterada térmicamente.

El acero tiene unas ventajas con respecto al aluminio, estas ventajas son el precio, la facilidad de trabajarlo (como por ejemplo que no es necesario soldadura TIG) y una tenacidad superior ya que absorbe esfuerzos sin sufrir roturas. En compensación, el aluminio destaca sobre el acero por su ligereza, ya que es tres veces más ligero que el acero, esto es una gran ventaja ya que con su uso se consigue fabricar chasis muy resistentes y ligeros.

Otra ventaja que ofrece el aluminio es que ni se oxida ni se erosiona al menos de que se encuentre en un entorno muy desfavorable, en cambio la mayor parte de los aceros no presentan esta ventaja. El aluminio tiene el inconveniente de que precisa una soldadura TIG para ser soldado, cosa que no es necesaria en el acero y entonces resulta más costoso.

Este ligero material se utilizó durante mucho tiempo en la construcción de prototipos y en algunos modelos de motocicletas de competición, tanto en bastidores de tipo monocasco como de tipo monoviga.

La marca japonesa Yamaha fabricó números bastidores basados en tubos de aluminio, casi todos eran destinados para motocicletas de competición. Al comienzo se fabricaba únicamente el basculante en aleación ligera, pero un poco más tarde esta iniciativa se llevó a cabo también en la construcción de chasis. Esto tuvo tanta repercusión, ya que hoy en día es muy común la construcción en aluminio de los chasis de doble viga fabricados para carreras.

Un inconveniente que presentan los bastidores fabricados en aluminio es la mala vida a fatiga que presenta este material, ya que es inevitable la rotura de componentes debido a la exposición de cargas cíclicas inversas. Esto hace que los elementos fabricados con este material tengan una cierta vida determinada. Este problema hace que el uso de este material, en motocicletas destinadas para un uso normal, no para competición, que tienen que ofrecer al usuario una vida más larga, no sea tan ventajoso debido a que para proporcionar una duradera vida es necesario usar más material en su construcción.

- Titanio

Este material se caracteriza por su excelente dureza, su gran resistencia contra la corrosión, sus propiedades físicas similares a las del acero y su color gris sombrío. Tiene una estructura hexagonal compacta que le proporciona esa excelente dureza, también es un material refractario y buen conductor eléctrico y térmico. Cuando se presenta en estado puro tiene un aspecto blanquecino brillante y es ligero y duro. A pesar de su ligereza presenta unas grandes propiedades mecánicas, pero cuenta con el inconveniente de que requiere sofisticadas técnicas de soldadura.

Con este material se pueden conseguir aleaciones con unas excelentes propiedades mecánicas como son una buena resistencia a la tracción, un alto límite elástico, una excelente soldabilidad y una buena ductilidad y dureza. Con las aleaciones de titanio se logra la construcción de elementos con una gran relación resistencia / masa. Esto le hace tener muy buenas expectativas al material de cara al futuro en la fabricación de piezas en el mundo de las motocicletas de carreras. La aleación más utilizada es Ti-6Al-4V, formada por titanio aleado con un 6% de aluminio y un 4% de Vanadio.

La aplicación de este material al mundo del motociclismo es relativamente reciente, ya que se comenzó a utilizar cuando dejó de ser de uso exclusivo en aviación. Las aleaciones usadas actualmente son bastante diferentes con respecto a las usadas durante el principio de la aplicación de este material.

Las primeras aplicaciones de este metal se dieron en la construcción de chasis tubulares, fue en caso de las BSA para el campeonato del mundo de motocross en los años 60. Estos presentaban el problema de que sufrían demasiada flexión ya que el Titanio tiene un Módulo de Young que es la mitad que el del acero. Debido a este fenómeno que se producía fracasaron los primeros bastidores fabricados con este metal, ya que suponían unos grandes costes y había unos métodos de construcción rudimentarios.

En la mitad de la década de los 70, cuando la mayoría de empresas del mundo del motociclismo carecían de fondos económicos para poder investigar sobre tratamientos y aplicación del titanio, la Federación Internacional de Motociclismo prohibió el uso del titanio.

Actualmente la situación ha dado un giro radical, ya que como se ha comentado anteriormente se disponen de aleaciones con muy buenas propiedades y con un coste más reducido. Así este material ya no es un material tan exclusivo, pudiendo ser usado y tratado con normalidad.

- Fibra de carbono

Se trata de un material compuesto de plástico reforzado con fibras de carbono o con grafito. Es un compuesto muy ligero y resistente pero presenta la desventaja de tener un elevado precio. La parte del compuesto que hace de base plástica suele ser una resina epoxy, pero también pueden ser otros componentes plásticos como es el vinilestes o el poliéster. Cuando se calienta el material el filamento de carbono se acorta y aumenta su sección.

Este material posee una baja densidad de 1.750 kg/m<sup>3</sup>, es un buen conductor eléctrico pero un mal conductor térmico. Tiene una elevada resistencia mecánica con un alto módulo de elasticidad. Posee también una buena resistencia contra agentes externos y una excelente capacidad de aislamiento térmico, resistiendo los cambios en la temperatura conservando su forma si usa una matriz termoestable.



El alto coste de los elementos fabricados en fibra de carbono tiene el motivo en dos causas principalmente:

- El costoso valor de los refuerzos de fibra, estos tienen un alto coste debido a que necesita un largo y caro proceso de producción. Este procedimiento se lleva a cabo en una atmósfera de hidrógeno durante un largo periodo que puede comprender hasta meses y requiere de una alta temperatura de entre 1100 y 2500 °C. El tiempo requerido depende de la calidad que se quiera conseguir debido a que se pueden hacer procesos para enriquecer alguna de sus propiedades después de obtener la fibra.
- La utilización de componentes termoestables complica el proceso de elaboración del elemento último, debido a que necesita un complicado utillaje determinado, como puede ser un horno autoclave.

Este material tiene diversas aplicaciones en sectores del automóvil, de aviones, de barcos y de ciclismo. Tiene diversos usos debido a su ligereza combinado con sus excelentes propiedades mecánicas. Cada día se usa más este material para multitud de usos en artículos más habituales como pueden ser accesorios deportivos, electrónica o joyería.

Este material está formado por filamentos, y cada filamento de carbono a su vez está compuesto por miles de unidades de fibra de carbono unidas entre sí. Cada filamento consistente básicamente en carbono, es un tubo estrecho que tiene un diámetro comprendido de entre 5 y 8 micrómetros. Este material posee una estructura atómica similar a la del grafito, se trata de unas láminas de átomos de carbono posicionados con una estructura hexagonal.

Se trata de un material amorfo, las hojas de los átomos del mismo se encuentran eventualmente foliadas u oprimidas. Esta situación hace que las hojas se integren evitando su deslizamiento entre superficies y aumentando de forma destacable su resistencia.

La utilización de este material comenzó hace pocos años, se empezó utilizando en el mundo de la aeronáutica y en el mundo aeroespacial, pero al observar sus buenos resultados pronto se importó su utilización al mundo automovilístico de competición y al mundo náutico. En el mundo del motociclismo no está tan implantado a nivel de piezas estructurales, pero sí está muy presente en la construcción de otros componentes de gran importancia pero que no tienen un gran peso estructural.

- Magnesio

Este material en estado puro es de color blanquecino con un reflejo plata, ligero y con un grado medio de resistencia. Cuando se expone al aire coge un color menos aparente pero no es necesario mantenerlo en atmosferas libres de oxígeno, debido a que tiene la protección de una pequeña capa de óxido que hace al material impermeable y es complicada de quitar. Este material al introducirlo en agua a una temperatura normal, se producen unas pompas de pequeño tamaño en la superficie del magnesio, este mismo fenómeno se produce también si en vez de sumergir el material se pulveriza.

Se trata de un material que tiene el problema de tener un alto grado de inflamabilidad, ya que se produce la combustión de manera sencilla cuando este está en forma de polvo o virutas, cuando está conformado en una pieza es inflamable pero en menor proporción. Cuando se ha inflamado es complicado de solventar el fuego, esto se debe a que reacciona con elementos presentes en el aire como son el nitrógeno y el dióxido de carbono. Cuando este material se inflama en una atmósfera de aire produce una lumbre de color blanco intenso, tuvo un uso muy común en el principio del mundo de la fotografía.

Este material tiene un precio alto, presenta dificultades a la hora de ser soldado, posee una vida limitada ya que el fallo se puede producir por fatiga o por corrosión. Este metal, ya sea fundido o trabajado de otras formas, se utilizó para la fabricación de bastidores monoviga en cierta época. La marca Porsche utilizó este material para el chasis de su modelo de carreras 917, que tenía un chasis triangulado soldado de tubos de magnesio.

- Cromo-molibdeno

Este material se podría haber englobado dentro del acero, ya que se trata de una aleación de acero que forma parte de la familia de los aceros inoxidables. Los aleantes que forman esta aleación son el molibdeno y el cromo, que son elementos utilizados para evadir la corrosión y la oxidación, y por otra parte el molibdeno aporta una mejor resistencia a las colisiones.

El cromo-molibdeno también conocido como Reynolds 531, T45 o 4130, tiene el mismo Módulo de Young y densidad que el resto de aleaciones de acero. Se diferencia positivamente del resto en que esta aleación es capaz de soportar mayor cantidad de carga antes de que se produzca el fallo o rotura, sobre todo después del proceso de soldadura. Debido a su alto precio su utilización prácticamente total se da en el mundo del motociclismo de carreras.

### *c) Elección del material*

El material elegido tras la realización de un minucioso estudio es el Aluminio 7075 T6. Esta elección se ha hecho en base a las buenas propiedades que proporciona este material a la estructura. Esta aleación de aluminio también es denominada Zicral, Ergal o Fortal Constructal.

Se trata de una aleación de aluminio que tiene como principal aleante el zinc, presente en el material entre un 5,1% y un 6,1%. Como otros aleantes minoritarios se encuentran el magnesio con una presencia de entre el 2,1% y el 2,9%, el cobre presente entre 1,2% y 2% y otros porcentajes menos significativos de silicio, manganeso, hierro, cromo, titanio y otros metales.

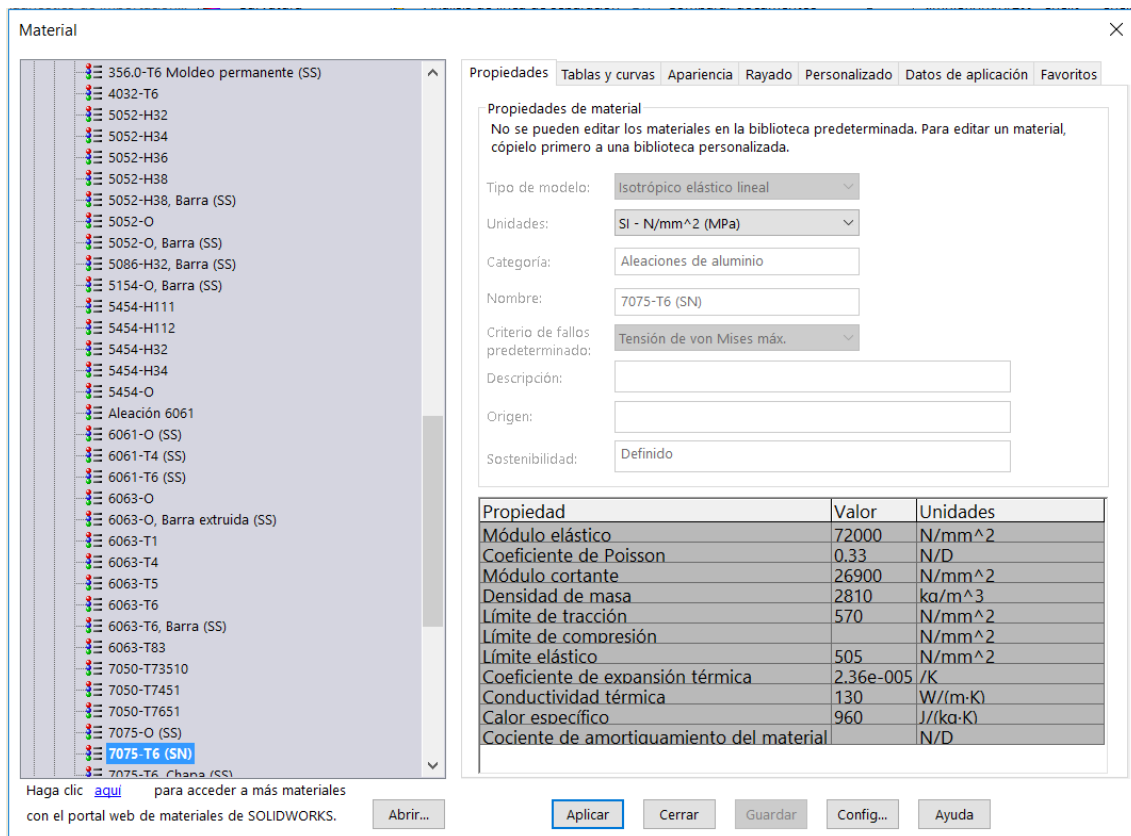
Este material destaca por su fortaleza, su fácil mecanizado y su resistencia a la fatiga, pero en contra tiene el inconveniente de poseer una mala soldabilidad y ser menos resistente a la corrosión comparado con otras aleaciones. Presenta un coste normal, por lo que tiene un uso en diversas aplicaciones cotidianas donde otras aleaciones más habituales no son aptas.

Este aluminio presenta una densidad de  $2810 \text{ kg/m}^3$  y las siguientes propiedades mecánicas: una resistencia a tracción que va desde los 510 a los 538 MPa, un rendimiento de la fuerza de entre 434 y 476 MPa y una rotura tras una elongación de entre el 5% y el 8%.

Dicho material tiene diversos usos entre los que destaca su utilización para el mundo de los transportes, debido a su gran ratio resistencia/densidad, y más concretamente en la automoción, el motociclismo, la náutica y la aviación. Otro uso destacado de este es la fabricación de armas para el ejército de los EEUU.

También tiene una alta utilización en la fabricación de herramientas molde por su excelente dureza, su alta densidad, sus buenas propiedades mecánicas y la posibilidad que ofrece de ser pulido. Este aluminio ha sufrido un proceso de refinado en otros aluminios de la serie 7000 para volver a ser utilizado siendo denominado como 7020 o 7050.

El software aporta las siguientes imágenes donde se muestra la selección del material y la tabla donde aparecen las propiedades mecánicas de este material:



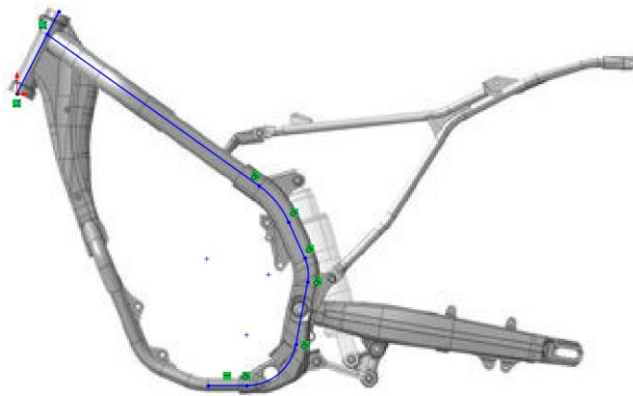
**Figura 67.** Cuadro de propiedades del material seleccionado proporcionado por SolidWorks

## 5. Modelado del chasis

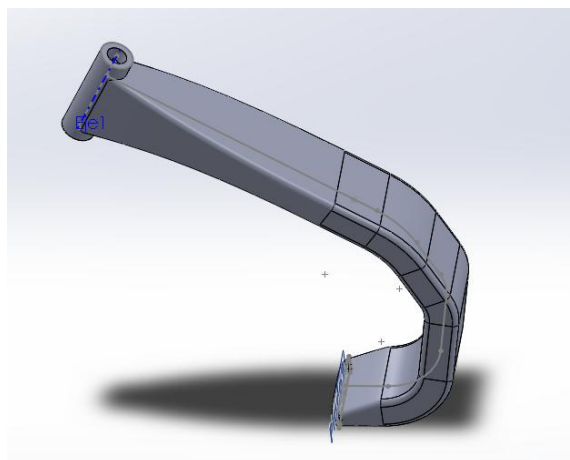
Para llevar a cabo el modelado del bastidor se decidió utilizar una combinación de diseño intencional, ya que se conocían los detalles de la estructura que se quería conseguir, y de diseño paramétricos, para así poder realizar modificaciones de manera sencilla si había que disminuir peso de la estructura o realizar refuerzos en alguna zona.

El diseño del chasis se ha realizado siguiendo los siguientes pasos:

1. Se ha dibujado el esqueleto central del bastidor utilizando la imagen real de perfil original como imagen de fondo para realizar un bastidor que encaje a la perfección con el resto de elementos. En este paso se ha diseñado también la pipa de la dirección.



**Figura 68.** Dibujo de la línea central del chasis nuevo sobre el bastidor original

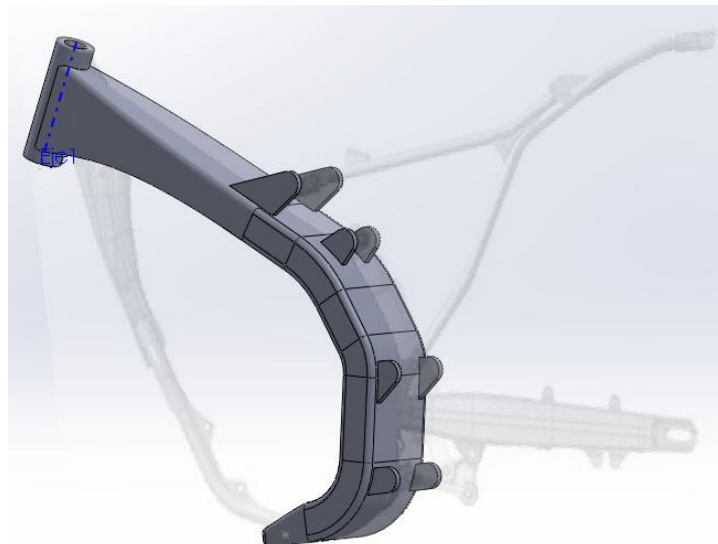


**Figura 69.** Primer diseño de la espina central

2. Se diseñaron los anclajes situados en la parte posterior del chasis, estos estaban destinados dos pares de ellos a ser la sujeción del amortiguador trasero y otros dos pares destinados a ser la sujeción donde se conecta el chasis con el subchasis.



**Figura 70.** *Diseño de los anclajes posteriores visto de frente*



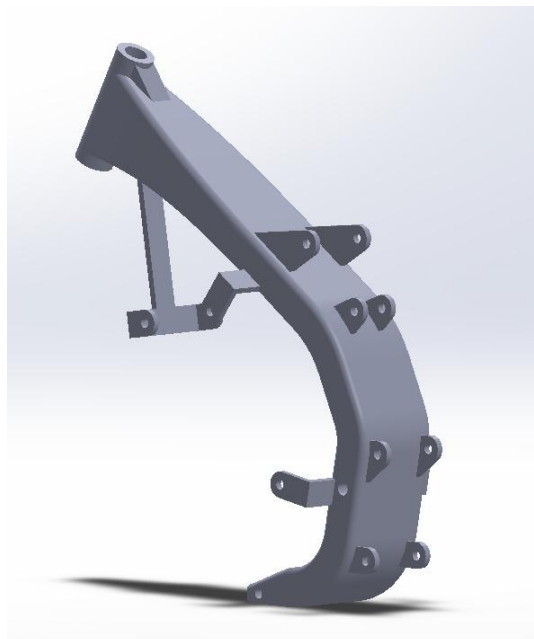
**Figura 71.** *Diseño de los anclajes posteriores visto lateralmente*

3. Se diseñan los anclajes interiores del chasis que se corresponden con las cuatro sujeciones del motor, de estas cuatro sujeciones posteriormente se eliminará la delantera por observar que no aportaba ningún efecto positivo a la estructura.

También se realizan los taladros de todos los anclajes, el hueco para el eje del bastidor y el refuerzo de forma triangular para aumentar la resistencia de la pipa de la dirección. Este refuerzo es creado debido a que la pipa es un elemento que sufrirá grandes esfuerzos.



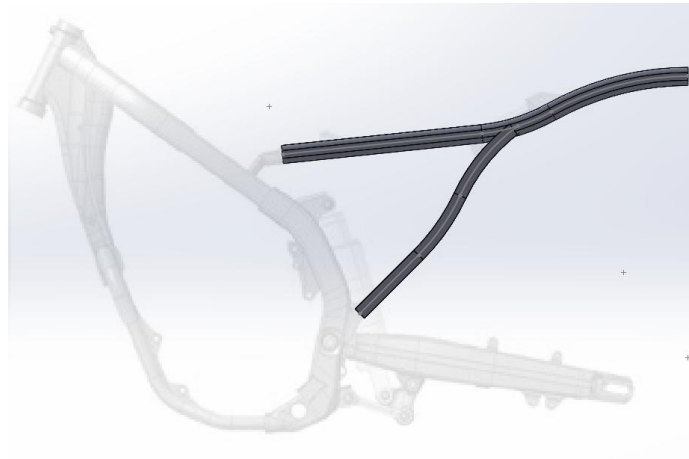
**Figura 72.** Diseño de los anclajes interiores, taladros y refuerzo visto de frente



**Figura 73.** Diseño de los anclajes interiores, taladros y refuerzo visto lateralmente



4. Se diseña la base del subchasis utilizando una viga continua curvada que siga la misma forma que el subchasis original, también se hacen los dos tirantes inferiores. Para este paso también se utiliza de imagen de fondo el bastidor original para conseguir la misma forma.

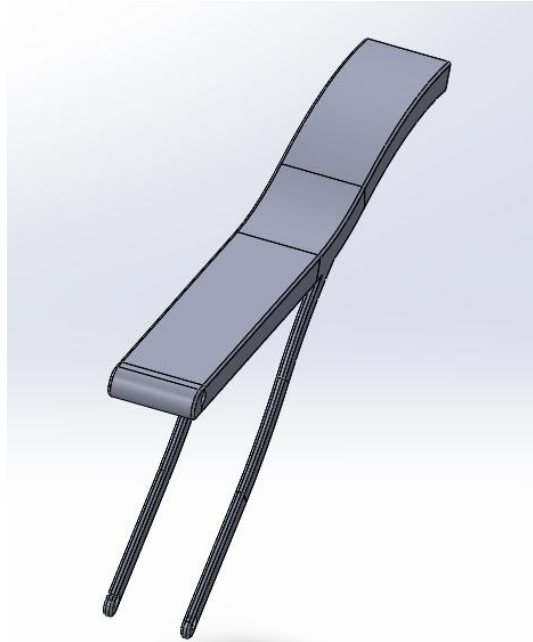


**Figura 74.** Diseño de la base del subchasis visto de frente

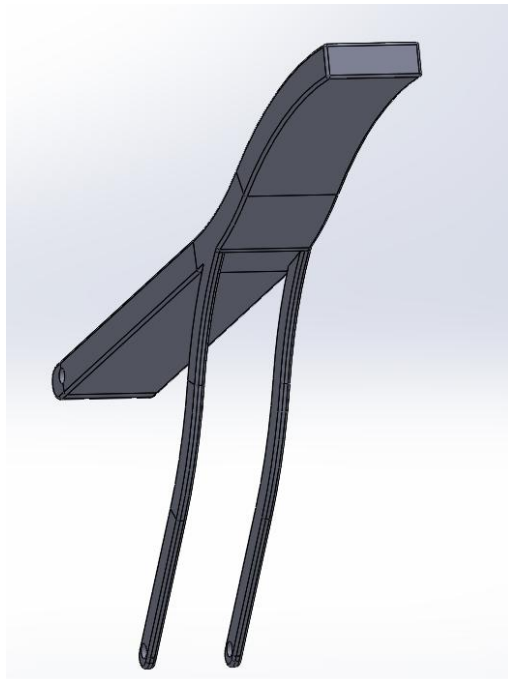


**Figura 75.** Diseño de la base del subchasis visto lateralmente

5. Se realizan los anclajes del subchasis para poder llevar a cabo la unión del chasis con el subchasis y se redondean todas las aristas del subchasis.

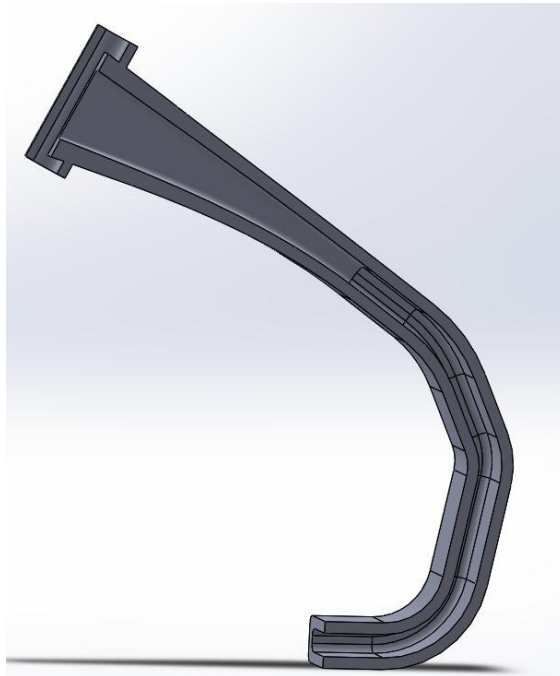


**Figura 76.** *Diseño del subchasis redondeado visto desde delante*

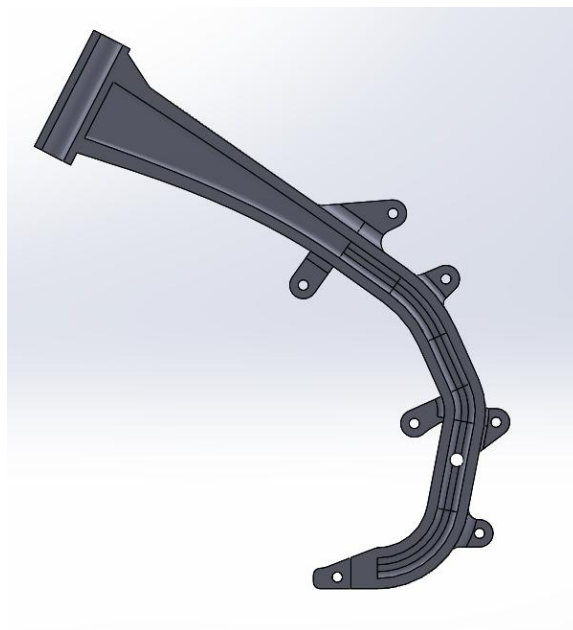


**Figura 77.** *Diseño del subchasis redondeado visto desde atrás*

6. Se lleva a cabo el vaciado del interior del chasis para aligerar peso, durante este vaciado se eliminan imperfecciones interiores del diseño. También se elimina el cuarto anclaje del motor, el que estaba en la posición más adelantada de todos.

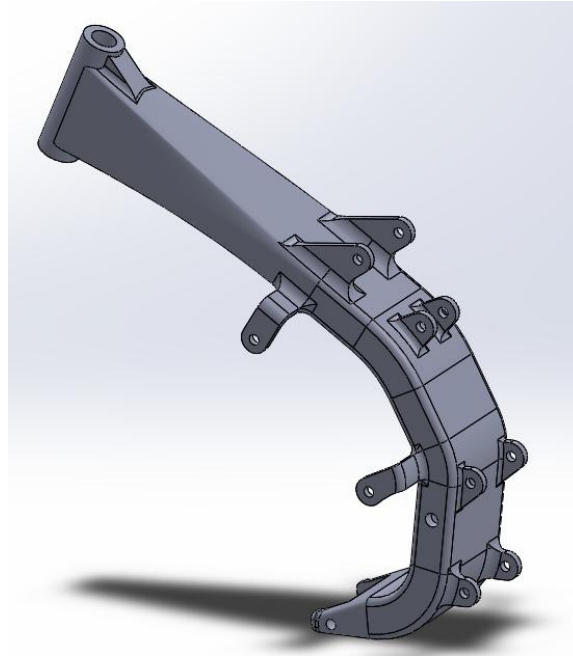


**Figura 78.** Vaciado de la espina central del chasis

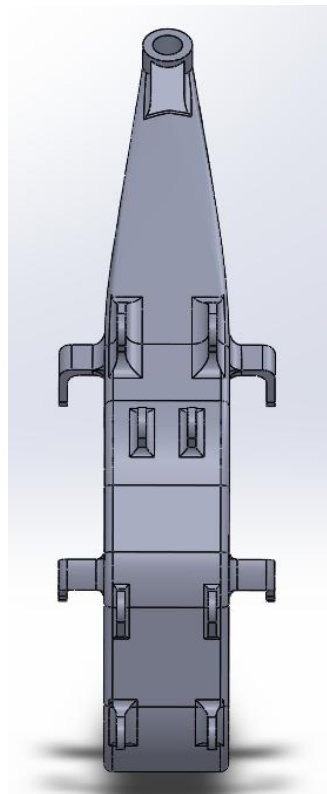


**Figura 79.** Vaciado del chasis

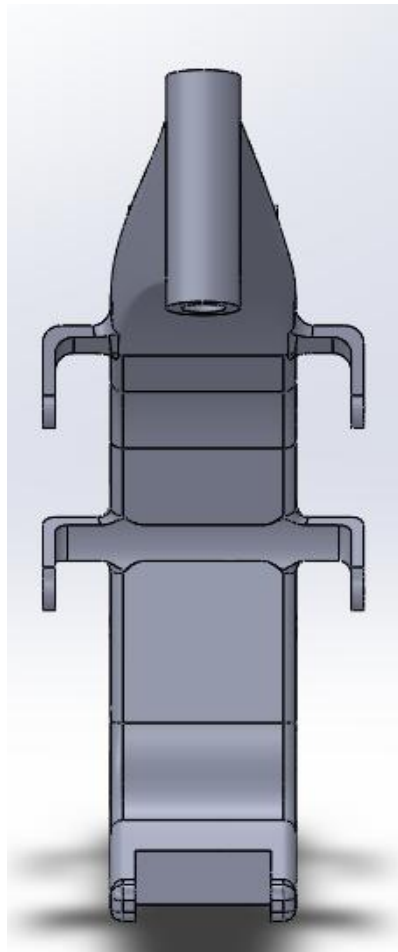
7. Se realiza el redondeo de todas las aristas del chasis, incluyendo también las bases de los anclajes del chasis.



**Figura 80.** Chasis redondeado visto lateralmente



**Figura 81.** Chasis redondeado visto desde atrás



**Figura 82.** Chasis redondeado visto desde delante

8. Se lleva a cabo la unión del chasis con el subchasis por medio de sus correspondientes anclajes. A los anclajes que se unen se les aplica la condición de que funcionen como si fueran tornillos, es decir, que aporten la fijación permitiendo a la vez la rotación. En el software para realizar esta unión sin necesidad de diseñar ninguna pieza extra se le aplica la condición de unión utilizando pasadores.

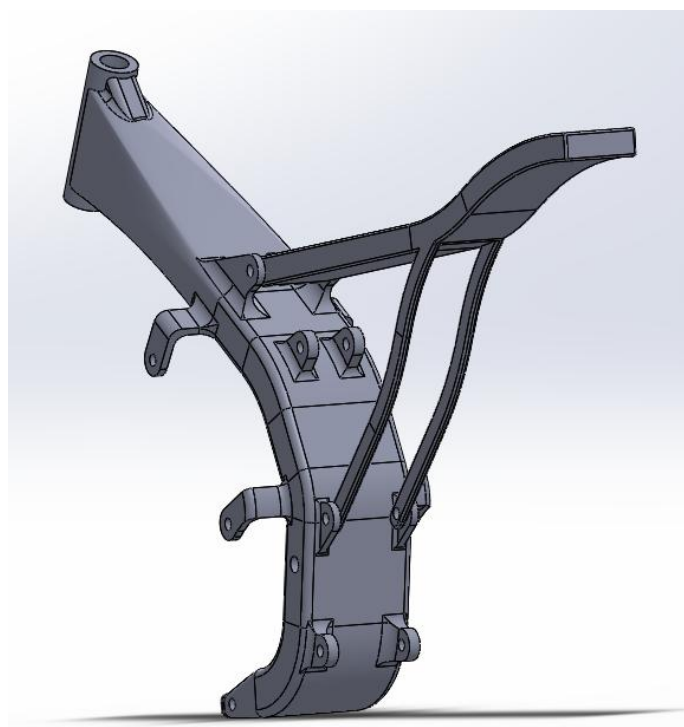
Al ensamblar el chasis con el subchasis hubo que rediseñar los tirantes inferiores del subchasis debido a que al unir ambas partes dichos tirantes interferían de manera leve en la geometría del chasis.

## 6. Diseño final del chasis

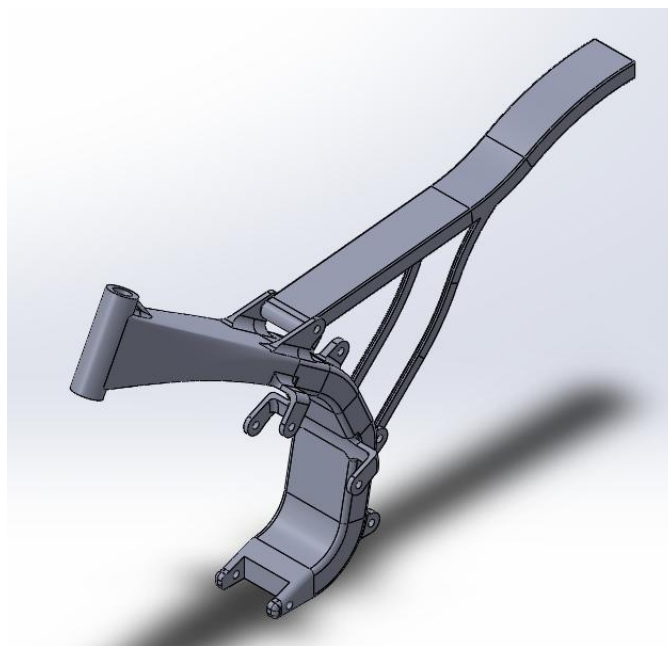
El chasis final ya ensamblado nos quedaría de la siguiente manera:



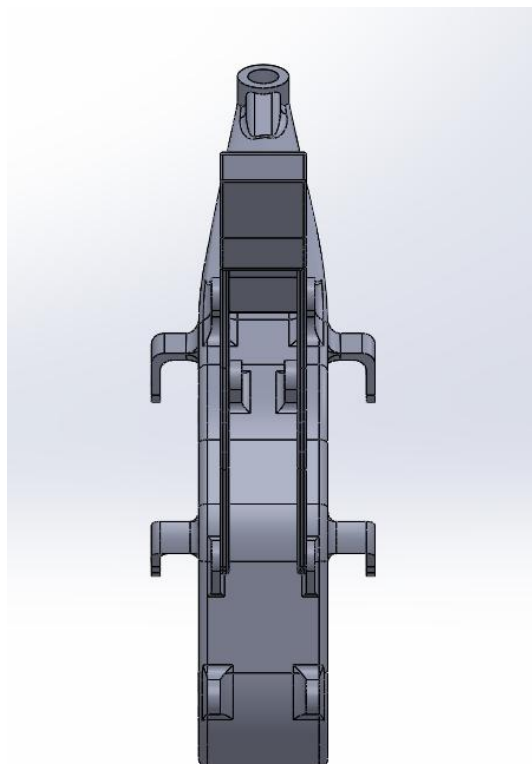
**Figura 83.** Chasis ensamble 1 visto de frente



**Figura 84.** Chasis ensamble 1 vista lateral 1

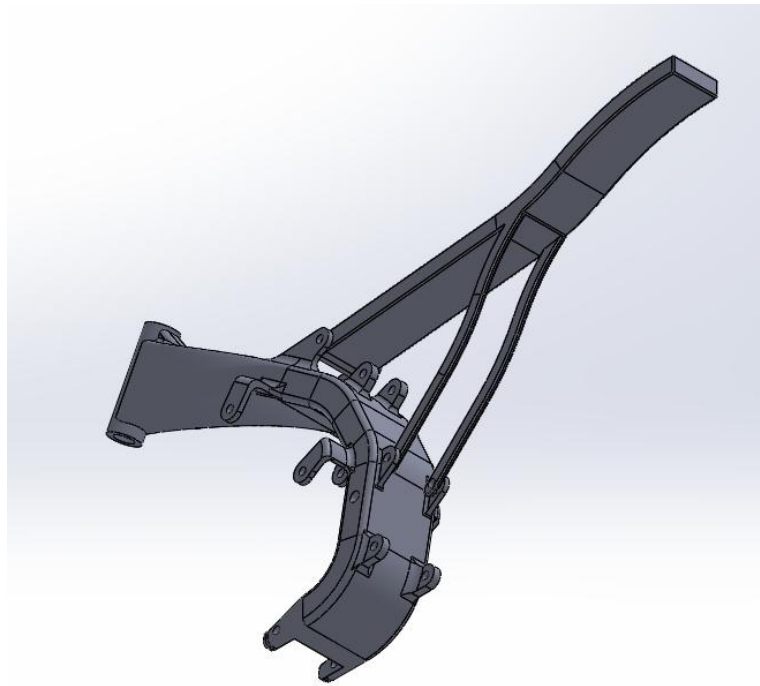


**Figura 85.** Chasis ensamble 1 vista lateral 2



**Figura 86.** Chasis ensamble 1 visto desde atrás





**Figura 87.** Chasis ensamble 1 visto desde abajo

Se estudió el chasis sometiéndole a los casos críticos y hubo que hacer 2 modificaciones para que el bastidor no fallara a la hora de su puesta en marcha. Las modificaciones que se realizaron fueron las siguientes:

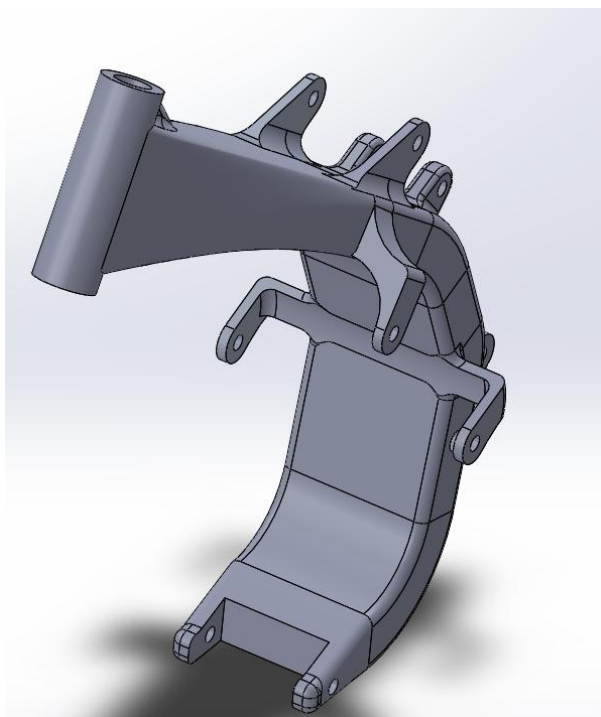
- Se reforzaron los primeros anclajes del motor, los que están más cercanos a la pipa de la dirección. Este refuerzo consistió en hacerlos más anchos y redondearlos.

Esta operación se realizó para que cumpliera en el caso crítico de salto cayendo primero con la rueda delantera.

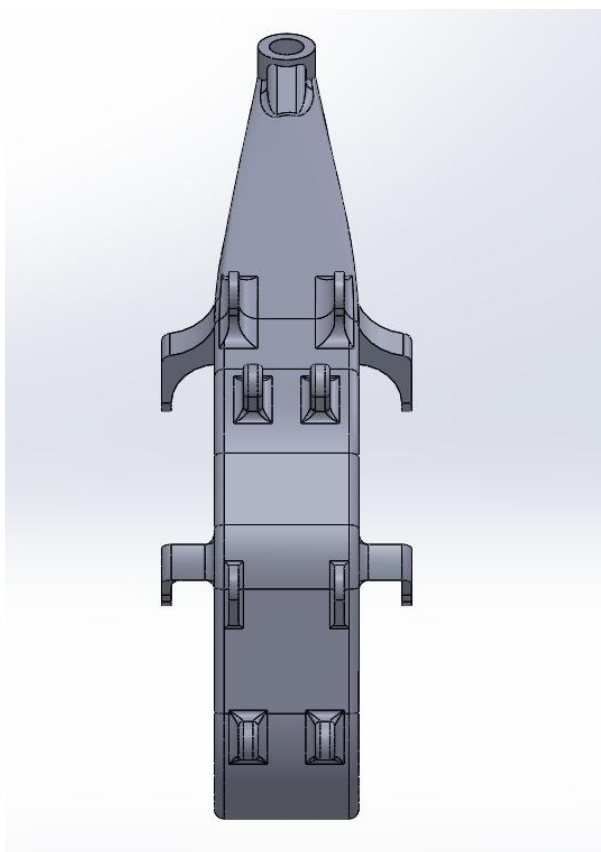
- Se reforzaron los anclajes posteriores del amortiguador trasero, lo que se realizó fue ensancharlos y posteriormente se redondearon junto con todos los anclajes de la parte posterior del chasis.

Esta operación se realizó para que cumpliera en el caso crítico de salto cayendo primero con la rueda trasera.

Quedando la estructura quedó de la siguiente manera:



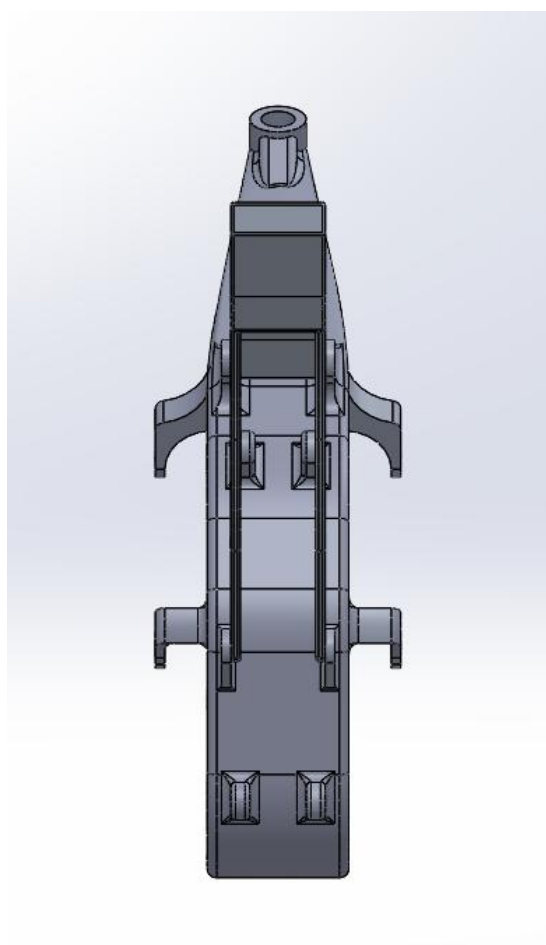
**Figura 88.** Chasis modificado visto lateralmente



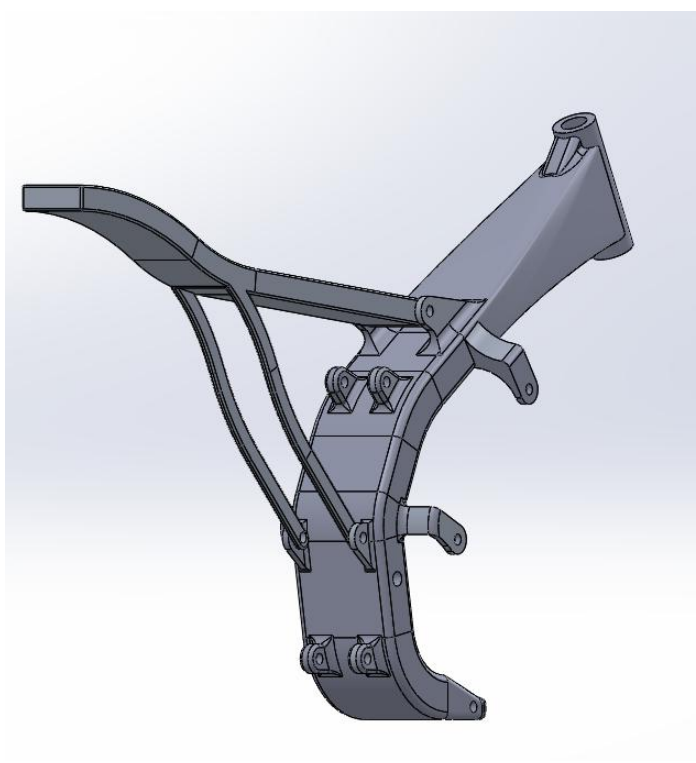
**Figura 89.** Chasis modificado visto desde atrás



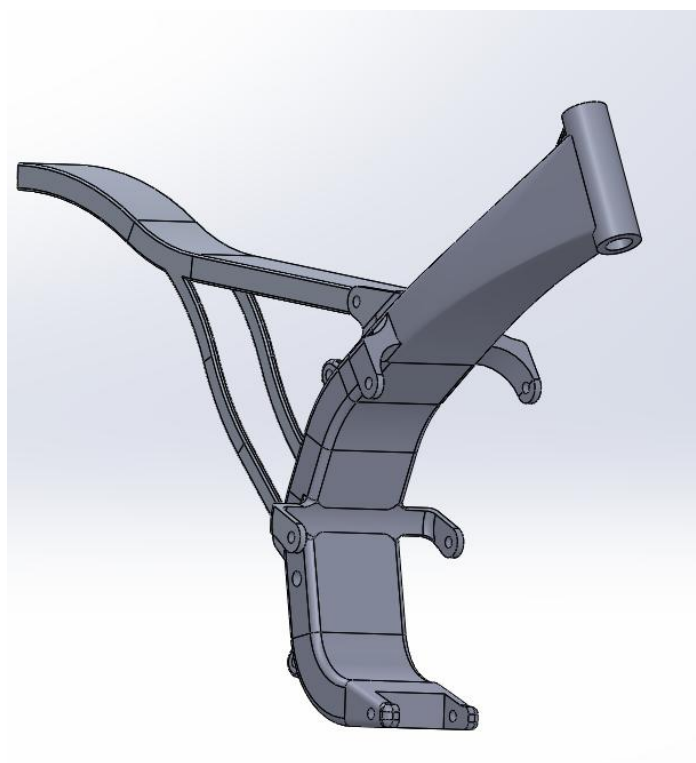
**Figura 90.** Chasis ensamble modificado vista 1



**Figura 91.** Chasis ensamble modificado vista 2



**Figura 92.** Chasis ensamble modificado vista 3



**Figura 93.** Chasis ensamble modificado vista 4

Este chasis cumplía con todos los requisitos necesarios para tener un buen comportamiento, pero tenía la problemática de tener un peso elevado. A pesar de ser una estructura prácticamente hueca el chasis pesaba cerca de los 20 kg y el subchasis cerca de los 10 kg, sumando una masa total del conjunto prácticamente de 30 kg.

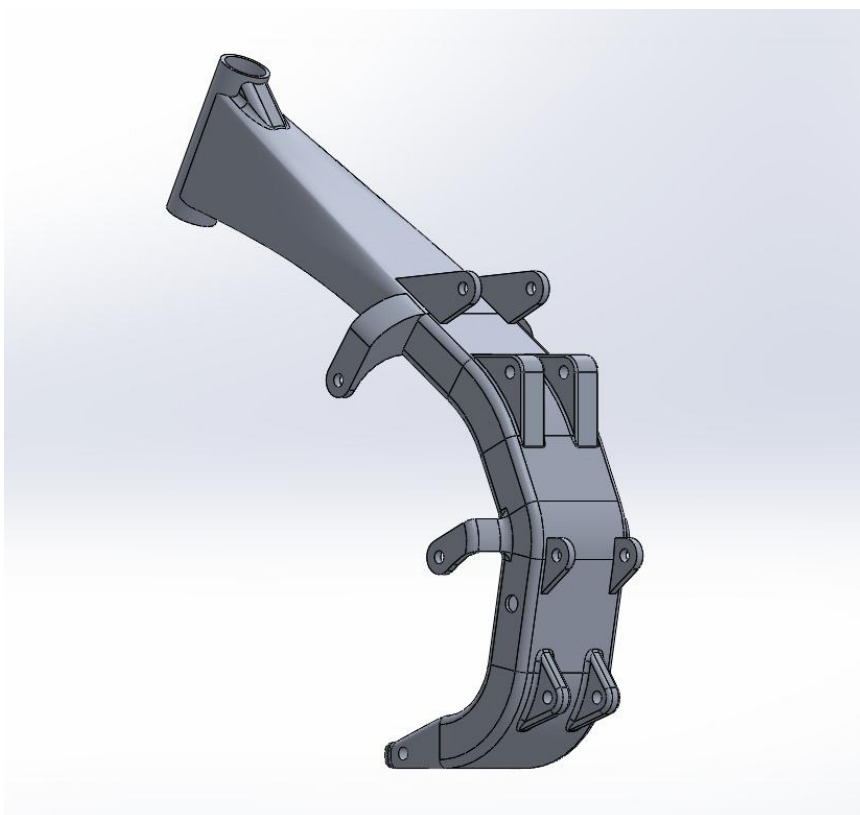
Entonces se procedió a reducir el peso de la estructura de manera drástica de la siguiente forma, primero se procedió a disminuir el peso del subchasis y posteriormente el del chasis. Una vez realizadas las modificaciones en ambos cuerpos se volvió a probar el comportamiento del conjunto. Fue necesario repetir este mismo proceso en varias ocasiones hasta conseguir una importante reducción de peso sin que se viera afectado el comportamiento del conjunto, ya que al retirar masa de los cuerpos y especialmente del chasis el comportamiento que se obtenía no era el adecuado y hubo que realizar ciertos refuerzos para volver a tener el comportamiento deseado.

La configuración final que se obtuvo del chasis definitivo variaba con respecto al anterior en lo siguiente:

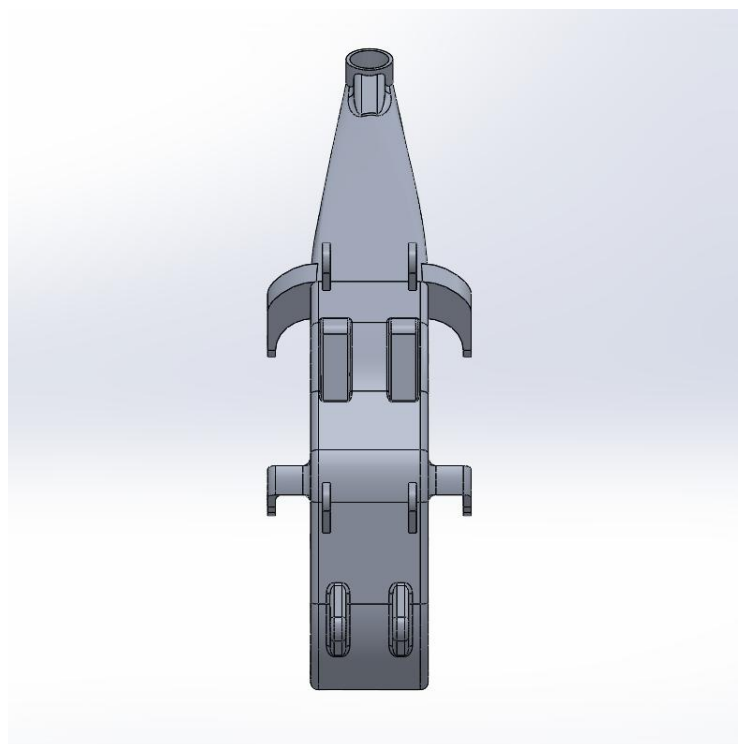
- El espesor de la pared de la espina central se redujo obteniendo un grosor de una tercera parte con respecto al anterior
- Se realiza una importante reducción de masa en la parte de la pipa de la dirección, se vació toda la zona lo máximo posible sin quitarle su robustez.
- Se aumenta de manera considerable las dimensiones de los anclajes exteriores que sirven para soportar el amortiguador trasero
- Se aumentan las dimensiones de los primeros anclajes interiores que soportan el motor, los más cercanos a la pipa de la dirección



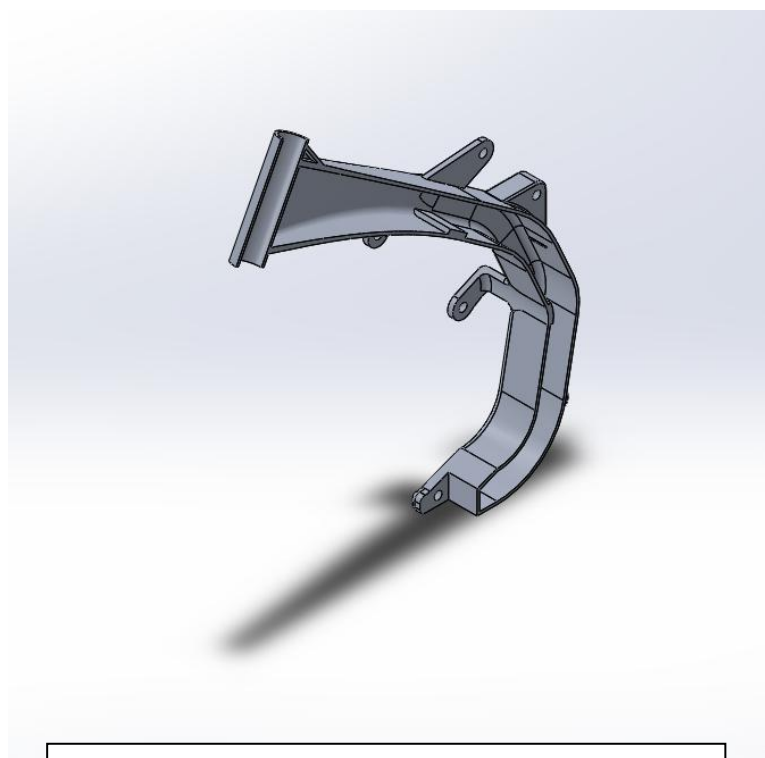
**Figura 94.** Chasis final visto de frente



**Figura 95.** Chasis final visto lateralmente



**Figura 96.** Chasis final visto desde atrás



**Figura 97.** Chasis final vista del interior



Propiedades de masa de chasis\_07  
 Configuración: Perfil\_hueco  
 Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico

Masa = 9699.56 gramos

Volumen = 3451801.37 milímetros cúbicos

Área de superficie = 1008268.26 milímetros cuadrados

Centro de masa: ( milímetros )  
 X = 414.71  
 Y = -224.39  
 Z = -0.04

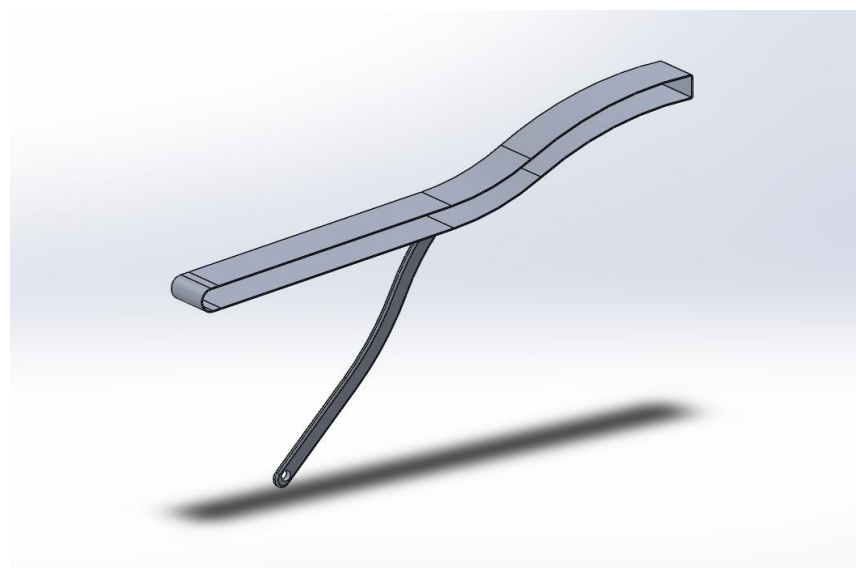
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )  
 Medido desde el centro de masa.  
 Ix = (-0.61, 0.79, 0.00) Px = 123637068.89  
 Iy = (-0.79, -0.61, 0.00) Py = 723614581.76  
 Iz = ( 0.00, 0.00, 1.00) Pz = 785377300.24

Momentos de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )  
 Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.  
 Lxx = 500970946.31 Lxy = -289846935.14 Lxz = 54650.35  
 Lyx = -289846935.14 Lyy = 346281743.53 Lyz = -440179.08  
 Lzx = 54650.35 Lzy = -440179.08 Lzz = 785376261.04

Momentos de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )  
 Medido desde el sistema de coordenadas de salida.  
 Ixx = 989352049.07 Ixy = -1192460354.04 Ixz = -113779.19  
 Iyx = -1192460354.04 Iyy = 2014468772.18 Iyz = -349046.15  
 Izx = -113779.19 Izy = -349046.15 Izz = 2941944358.44

**Figura 98.** Propiedades del Chasis final

El subchasis sólo sufrió la modificación de pasar de ser maciza la espina central a ser hueca con un espesor de pared delgado pero suficiente para ofrecer un comportamiento fiable.



**Figura 99.** Subchasis final vista del interior 1



**Figura 100.** Subchasis final vista del interior 2

Propiedades de masa de subchasis\_03  
 Configuración: Predeterminado  
 Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico

Masa = 1896.93 gramos

Volumen = 675063.20 milímetros cúbicos

Área de superficie = 498962.52 milímetros cuadrados

Centro de masa: ( milímetros )  
 X = 858.24  
 Y = -88.05  
 Z = 0.00

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )  
 Medido desde el centro de masa.

lx = ( 0.92, 0.40, 0.00)	Px = 17812078.48
ly = (-0.40, 0.92, 0.00)	Py = 92374328.03
lz = ( 0.00, 0.00, 1.00)	Pz = 104604791.81

Momentos de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )  
 Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

Lxx = 29705121.11	Lxy = 27300687.70	Lxz = -1.48
Lyx = 27300687.70	Lyy = 80481285.40	Lyz = -0.09
Lzx = -1.48	Lzy = -0.09	Lzz = 104604791.81

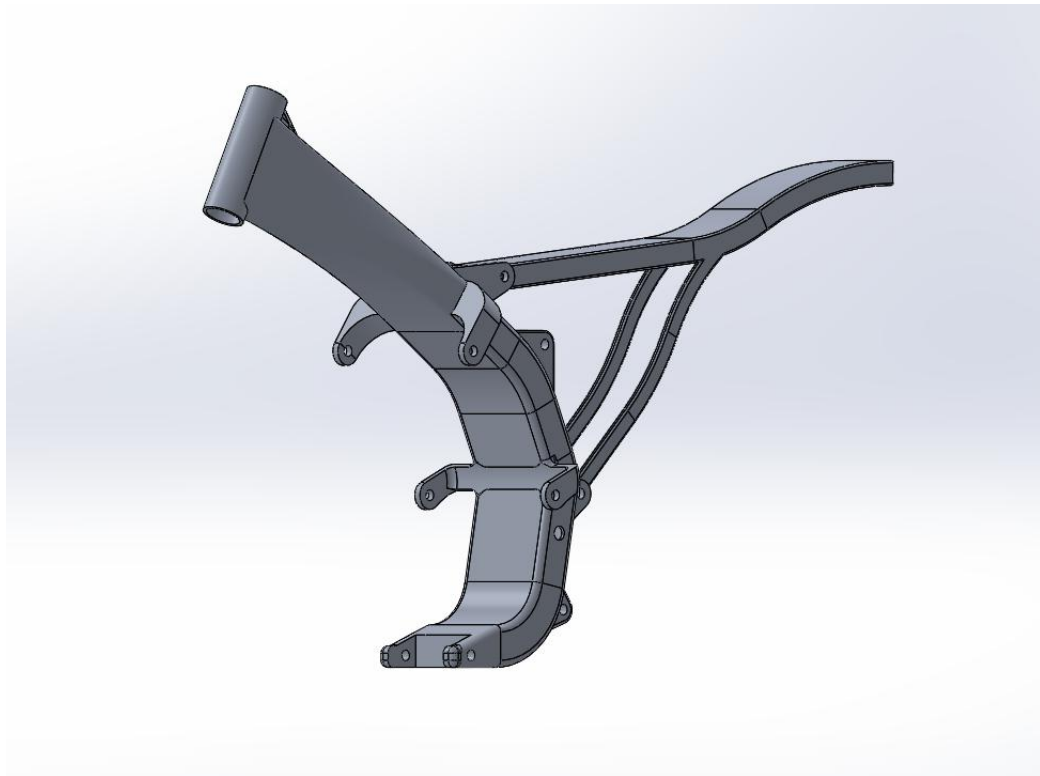
Momentos de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )  
 Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

lxx = 44410683.20	lxy = -116042062.68	lxz = -3.97
lyx = -116042062.68	lyy = 1477717512.12	lyz = 0.17
lzx = -3.97	lzy = 0.17	lzz = 1516546580.62

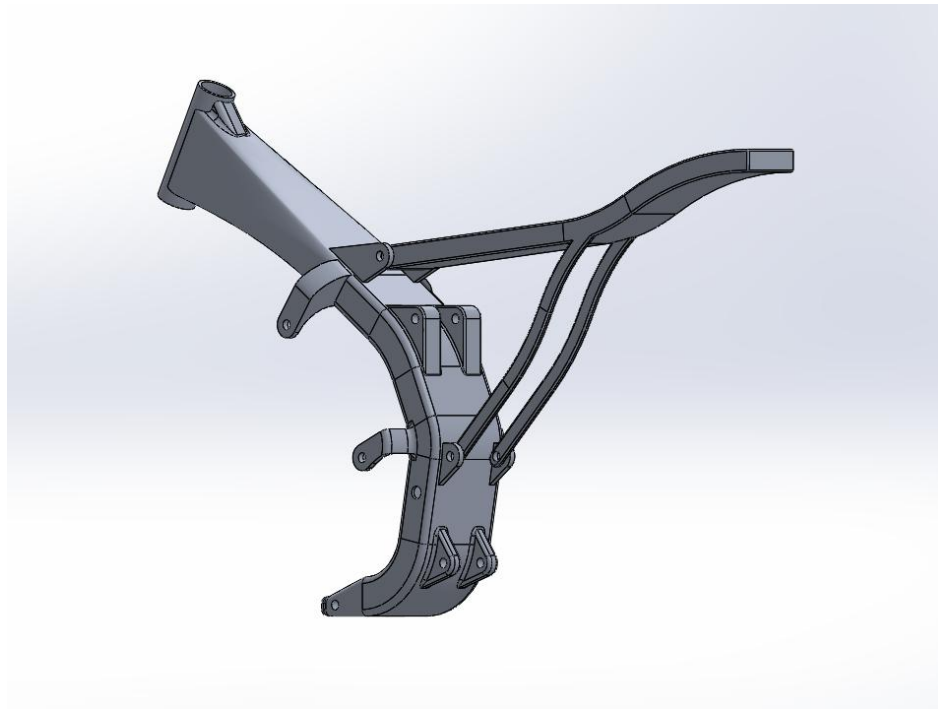
**Figura 101.** Propiedades subchasis final

Con estas modificaciones se consiguió reducir el peso del conjunto a prácticamente un tercio de lo que pesaba anteriormente. La masa del chasis actual es de 9,69 kg, la del subchasis de 1,89 kg y en consecuencia la del conjunto es de 11,59 kg.

Sería inviable una mayor reducción del peso de la estructura sólo modificando la geometría. Sí se podría disminuir el peso mediante la utilización de otro material de menor densidad que tuviera unas buenas propiedades mecánicas, pero ese tipo de materiales tienen un coste demasiado elevado y no sería viable su utilización. El chasis está lo más optimizado posible teniendo en cuenta los grandes esfuerzos que tiene que soportar por el uso al cual va a estar destinado.



**Figura 102.** Chasis final ensamblado vista lateral 1



**Figura 103.** Chasis final ensamblado vista lateral 2

Propiedades de masa de Ensamblaje7  
 Configuración: Predeterminado  
 Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Masa = 11596.49 gramos

Volumen = 4126864.57 milímetros cúbicos

Área de superficie = 1507230.78 milímetros cuadrados

Centro de masa: ( milímetros )  
 X = 122.43  
 Y = 4.94  
 Z = 818.59

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )  
 Medido desde el centro de masa.

lx = ( 0.86, -0.52, 0.00)	Px = 455772956.59
ly = ( 0.52, 0.86, 0.00)	Py = 839414682.74
lz = ( 0.00, 0.00, 1.00)	Pz = 1227730362.34

Momentos de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )  
 Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

Lxx = 558340918.29	Lxy = -169791517.65	Lxz = 84006.41
Lyx = -169791517.65	Lyy = 736847107.08	Lyz = -431370.36
Lzx = 84006.41	Lzy = -431370.36	Lzz = 1227729976.31

Momentos de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )  
 Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

lxx = 8329231245.98	lxy = -162777469.84	lxz = 1162284569.10
lyx = -162777469.84	lyy = 8681277390.19	lyz = 46465364.04
lzx = 1162284569.10	lzy = 46465364.04	lzz = 1401835988.82

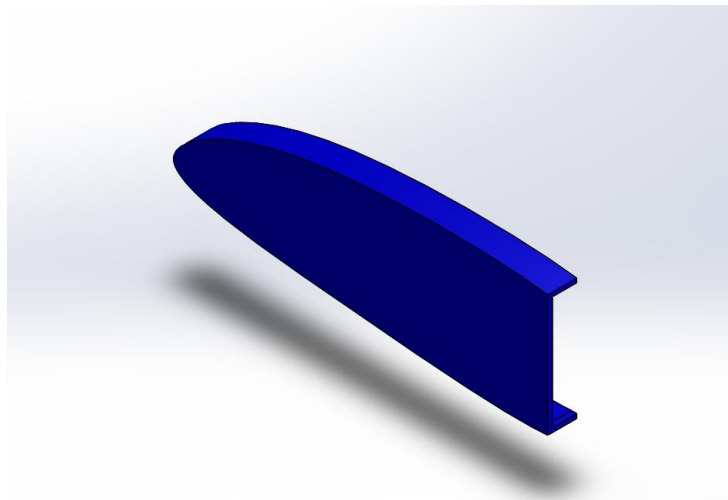
**Figura 104.** Propiedades chasis final ensamblado

## 7. Diseño del protector de cadena

Se lleva a cabo el diseño de un protector como elemento de protección de la cadena de la motocicleta. Esta pieza plástica se diseña debido a que al rediseñar el bastidor la cadena queda expuesta por fuera de la estructura. Este fenómeno antes no se producía ya que la cadena iba por el interior de la estructura y era el propio chasis el que cubría la cadena. Pero con los nuevos cambios estructurales es necesario el diseño de esta nueva pieza proteger dicha pieza.

Este protector va situado en la parte izquierda del chasis a la altura donde comienza la cadena, está pensado para proteger la parte de la cadena situada en la zona más cercana al motor. Sus funciones principales son las de proteger la cadena de agentes externos y evitar posibles problemas que sucederían si entrara en contacto la pierna del piloto con la cadena.

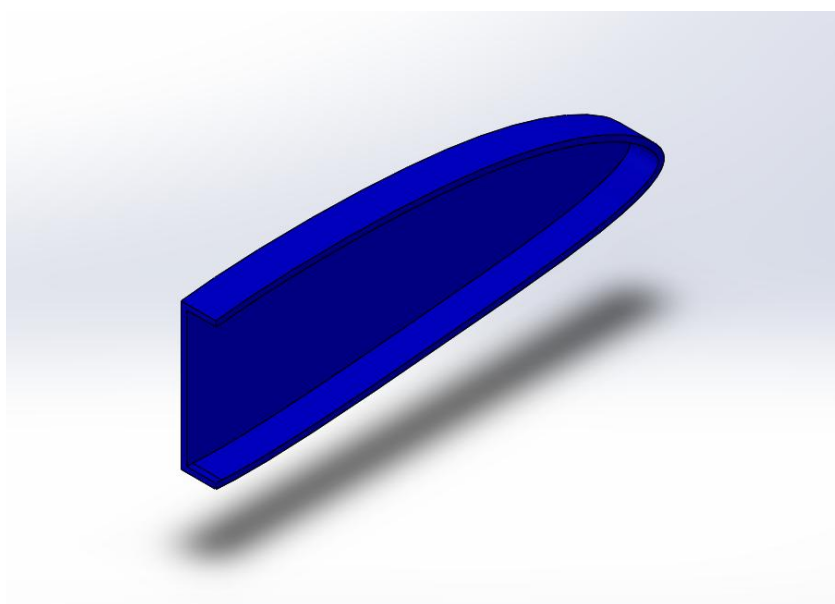
Se buscó diseñar una pieza de material plástico con una forma sencilla que tuviera un fácil diseño, una sencilla y económica fabricación y un cómodo montaje, todo esto combinado con que fuera una pieza lo más práctica posible cumpliendo totalmente su función y pudiéndose montar y desmontar de manera sencilla.



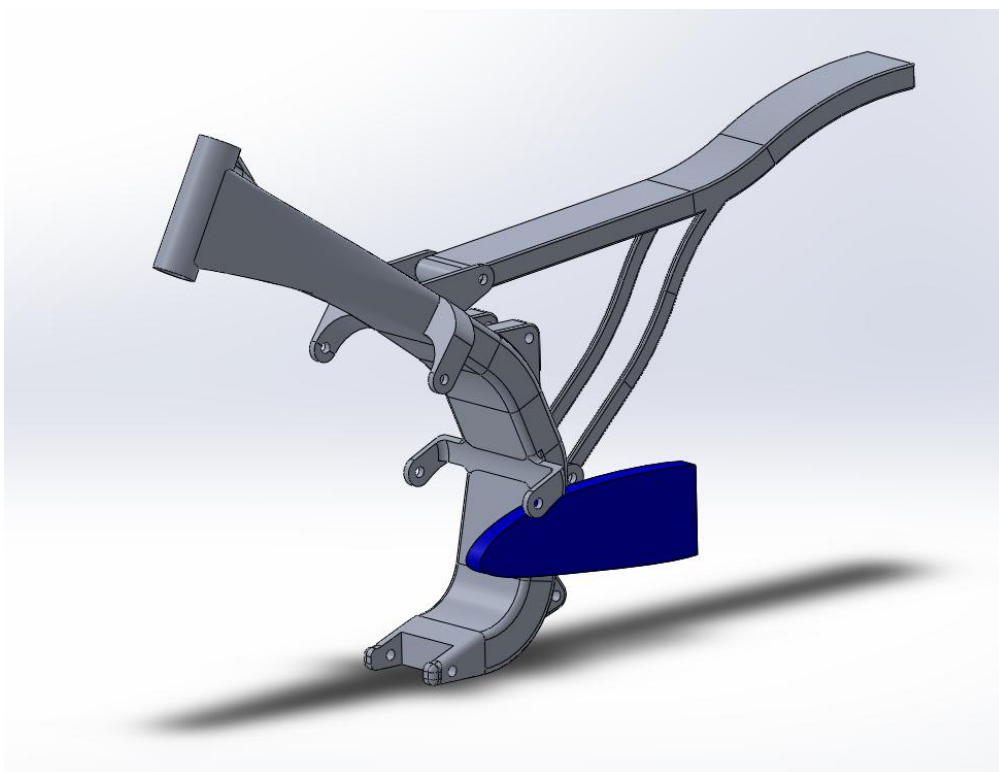
**Figura 105.** Protector de cadena vista lateral exterior



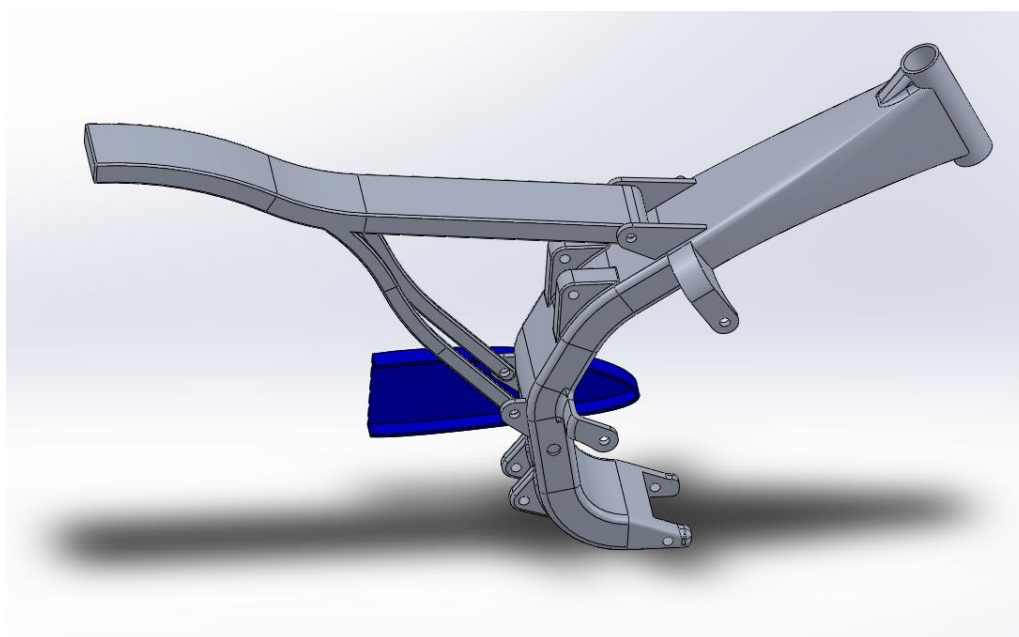
**Figura 106.** Protector de cadena vista de la planta



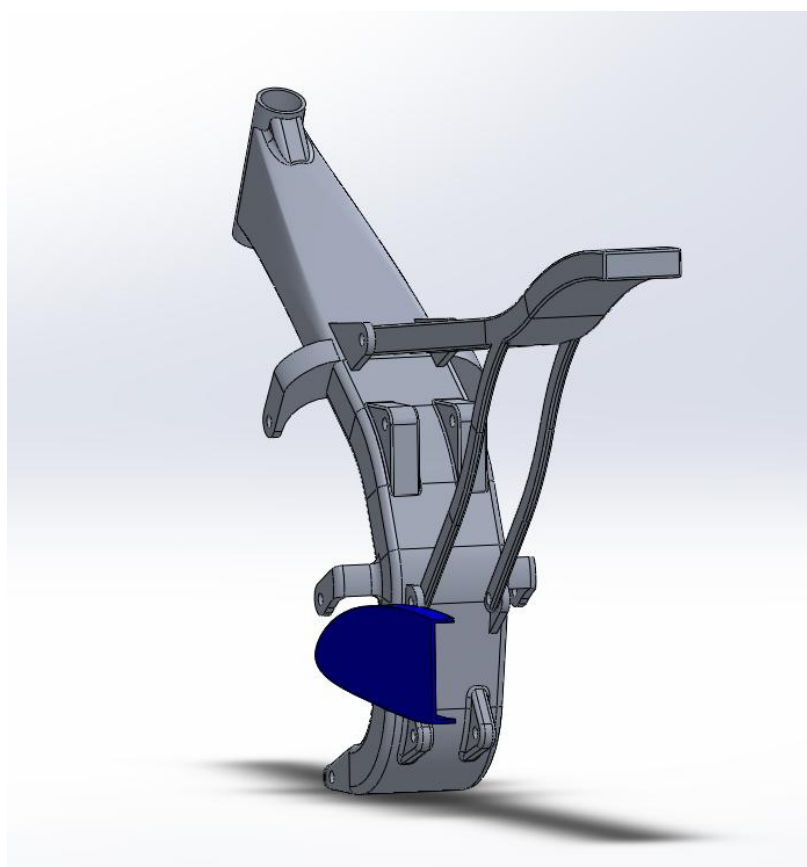
**Figura 107.** Protector de cadena vista lateral interior



**Figura 108.** Protector de cadena montado vista 1



**Figura 109.** Protector de cadena montado vista 2



**Figura 110.** Protector de cadena montado vista 3



## IV. Evaluación del chasis

### 1. Introducción y consideraciones

Una vez diseñado el chasis con todos los requisitos y características necesarias para su correcto funcionamiento se prueba el comportamiento que tendrá al usarse y su vida a fatiga.

Para probar su comportamiento se simulan los esfuerzos a los que estará sometido el bastidor haciendo un uso normal de la motocicleta. Estos esfuerzos se simularán como si fueran estáticos por tema de simplificación de los cálculos, y se utilizará para el estudio un valor de las cargas superior al del instante en el cuál sea máximo el esfuerzo en cada caso. Esto será así para asegurar que en el chasis no se producirá fallo aunque tenga lugar una situación más extrema de lo habitual.

Se simularán las situaciones más críticas, con sus correspondientes esfuerzos, que se puedan dar haciendo un uso normal de una motocicleta de off-road. Estas situaciones críticas se han derivado de un uso normal de una categoría de estas motocicletas que están destinadas para competir en circuitos soportando unas duras condiciones. Los esfuerzos más críticos previstos haciendo un uso normal de estas motocicletas que se van a estudiar se producen en las siguientes situaciones de estudio:

- Frenada máxima
- Aceleración máxima
- Paso por curva
- Salto cayendo primero con la rueda delantera
- Salto cayendo primero con la rueda trasera

En cada una de estas situaciones se va a llevar a cabo un estudio estático independiente. En cada estudio, correspondiente a cada situación, se va a estudiar el comportamiento del bastidor ante la aplicación de unos esfuerzos determinados en unos lugares concretos del mismo y con la previa aplicación de unas restricciones de movimiento en ciertas zonas del chasis.

Este estudio de los diferentes casos críticos se lleva a cabo mediante el uso del método de elementos finitos con el software SolidWorks v. 2015. Estos estudios deben arrojar unos resultados positivos en los que la tensión a la que se produzca el fallo en la estructura esté alejada y por debajo del límite elástico y de la tensión a la que se produce el fallo en el material, y que también ofrezca un coeficiente de seguridad adecuado.

Por otro lado, el estudio de vida a fatiga tiene una gran importancia a largo plazo, ya que calcula el número de ciclos que soportará la estructura sin fallar, estando sometida esta a unos determinados ciclos de carga y descarga. Cada ciclo de fluctuación de la tensión afecta produciendo un pequeño daño añadido a la pieza y después de una determinada cantidad de ciclos tendrá lugar la rotura de la pieza por fatiga.

También cabe destacar en fatiga que en determinados casos cuando se aplica un valor de tensión por debajo de un determinado límite nunca se llegará a producir la rotura aunque se le aplicara un número de ciclos infinito.

Cuando ya se ha obtenido la cantidad de ciclos que producirá el fallo para cada rango se procede al cálculo del daño. La totalidad del daño se obtiene sumando el daño causado por cada rango.

Para estudiar la vida a fatiga del chasis se calcularán la cantidad de ocasiones de cada situación crítica que se producen en una carrera y luego se calcularán el número de carreras que soportará el bastidor sin producirse fallo debido a la fatiga.

El estudio de vida a fatiga goza de una gran importancia a largo plazo, ya que calcula el número de ciclos que soportará la estructura estando sometido a unos determinados esfuerzos cíclicos. Este estudio se lleva a cabo mediante el uso del método de elementos finitos con el software SolidWorks v. 2015.

Hay que tener en cuenta que para el estudio del chasis tanto del comportamiento como de la vida a fatiga se ha utilizado el método de elementos finitos. Este método no es un método exacto, ya que ofrece mediante resolución numérica un resultado lo más aproximado posible. El resultado que nos ofrece el método de elementos finitos depende en gran parte del software utilizado, de la exactitud del mismo, del tipo de método numérico seleccionado y de la forma y tamaño de malla aplicado.

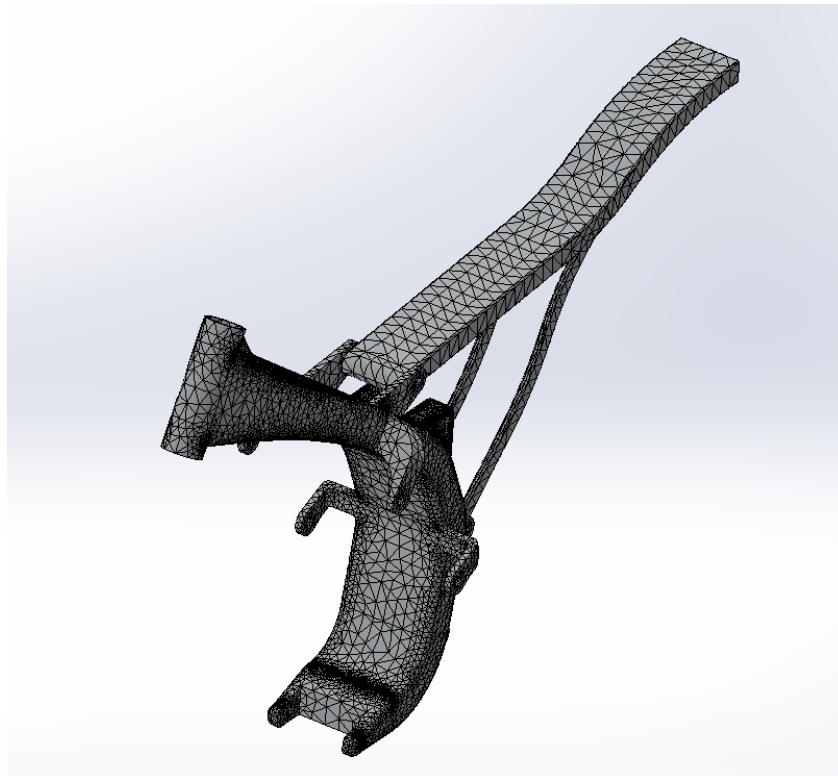
## 2. Mallado del chasis

El mallado del chasis es un factor muy condicionante a la hora de realizar el estudio mediante el método de elementos finitos. El resultado puede variar de manera significativa en función del tipo y el tamaño de mallado utilizado. Los tipos de mallado utilizado en este estudio en función de las necesidades de los resultados de cada estudio son los siguientes:

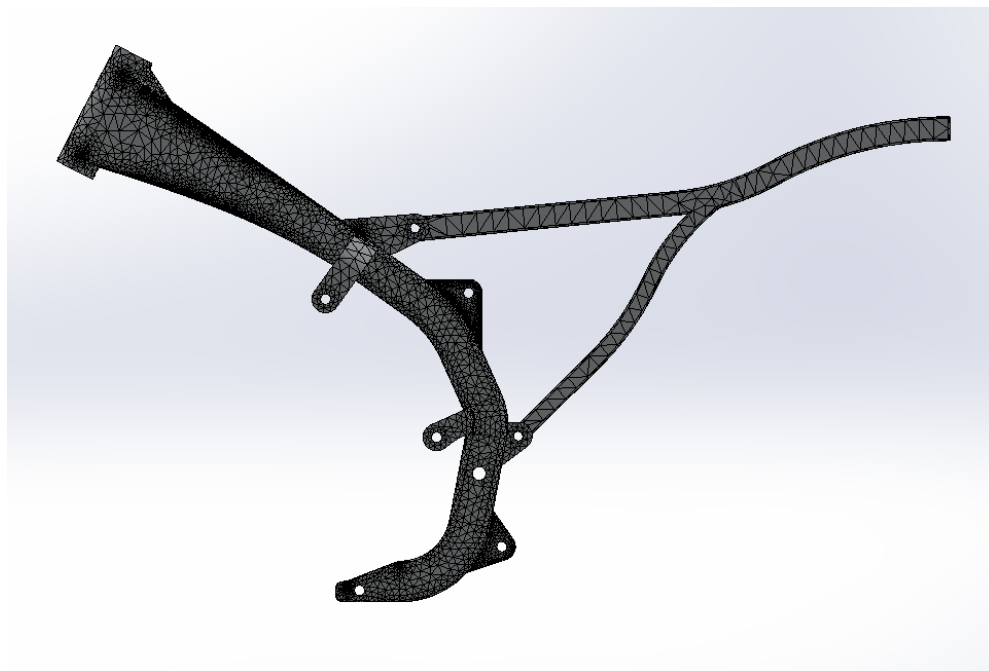
- **Mallado standard**

Es el mallado que viene predefinido por el software, pero en este estudio se ha cambiado el tamaño de la malla por un tamaño inferior para obtener mayor exactitud en los resultados obtenidos. A continuación se muestran algunas imágenes de cómo queda el bastidor al aplicarle dicha malla.

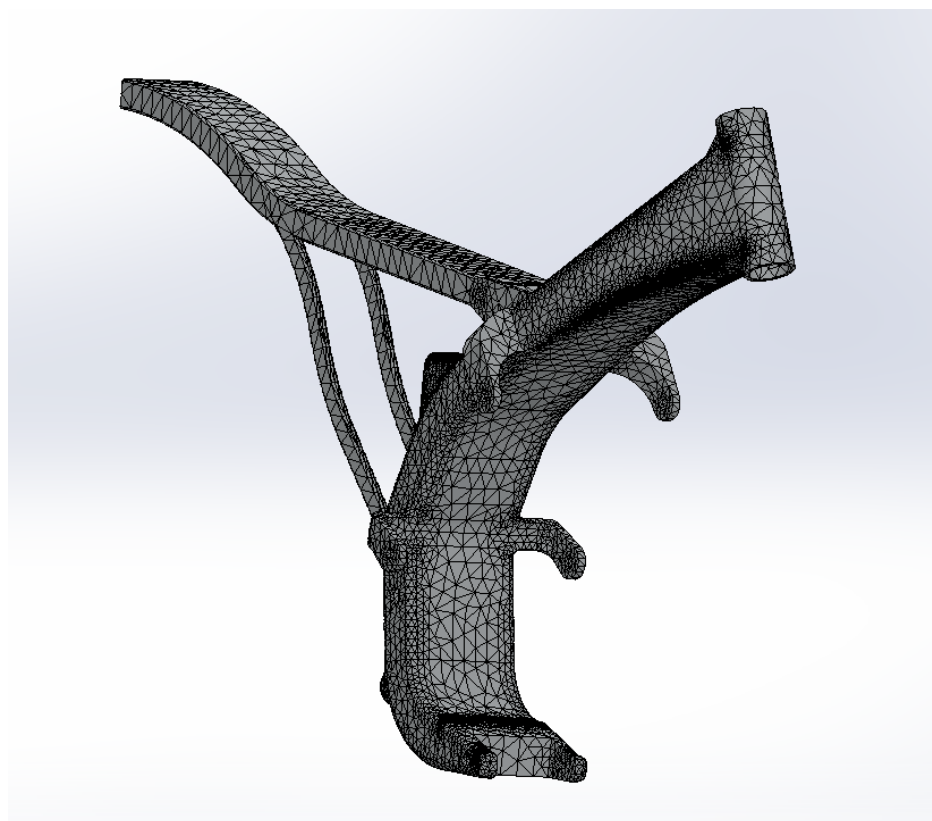
Este tipo de mallado ha sido el utilizado primeramente en el estudio de todos los casos de estudio y no se ha cambiado excepto si no se ha quedado satisfecho con el resultado ofrecido.



**Figura 111.** Mallado standard del chasis vista 1



**Figura 112.** Mallado standard del chasis vista 2



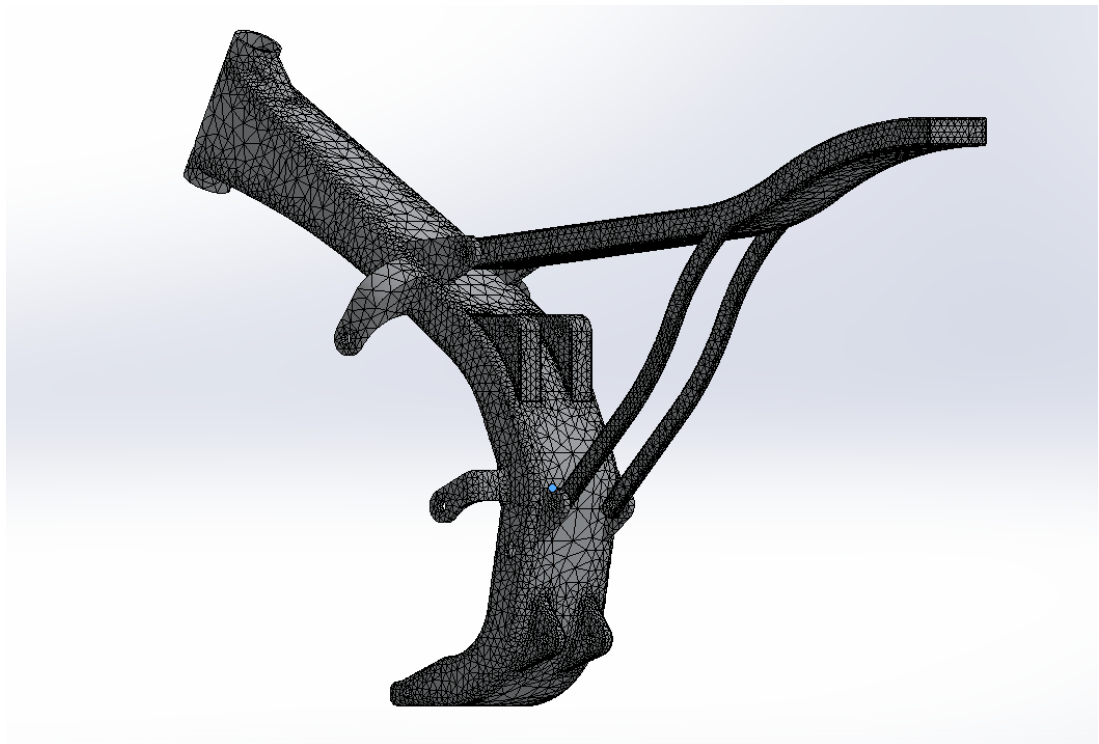
**Figura 113.** Mallado standard del chasis vista 3

- **Mallado con curvatura**

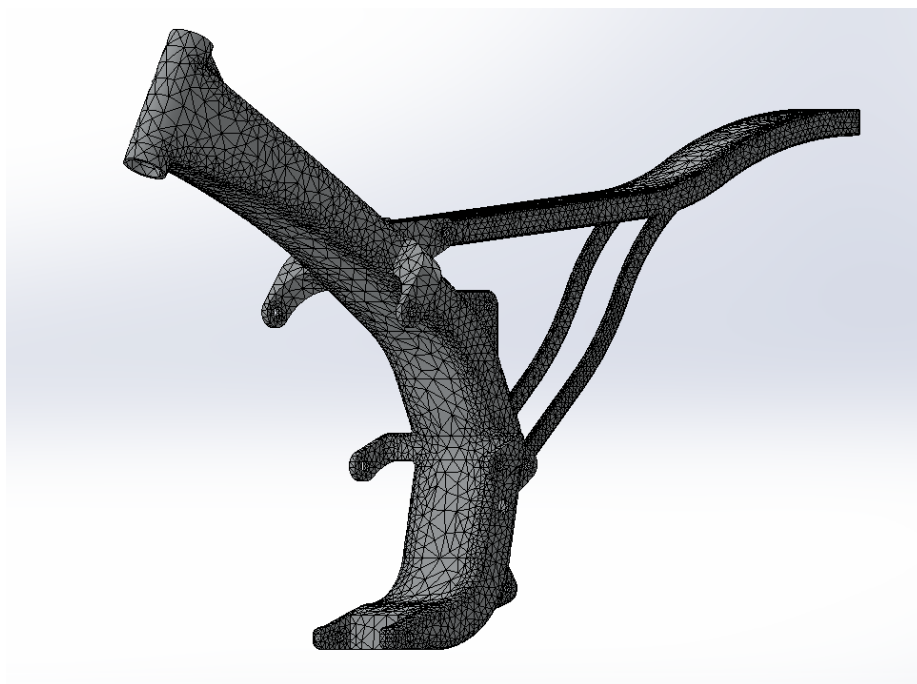
Este mallado se llevó a cabo para los dos casos de estudio más críticos que son el salto cayendo primero con la rueda delantera y el salto cayendo primero con la rueda trasera.

Esto se realizó para obtener unos resultados más exactos en las zonas donde se concentraban las mayores tensiones, ya que en estas zonas con el mallado general no se veía muy exacto qué puntos o zonas reducidas eran las más críticas. Entonces se procedió a hacer un mallado basado en curvatura con un control de malla en esas zonas de mayor concentración para obtener resultados lo más exactos posibles.

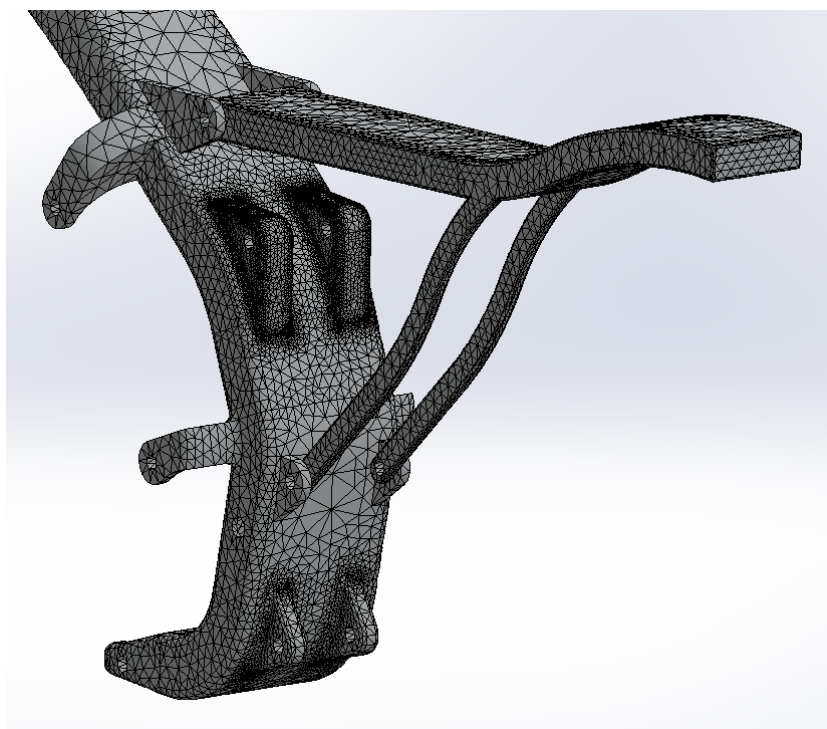
Este tipo de mallado aplicado con las características explicadas en el bastidor queda de la siguiente manera:



**Figura 114.** Mallado basado en curvatura del chasis vista 1



**Figura 115.** Mallado basado en curvatura del chasis vista 2



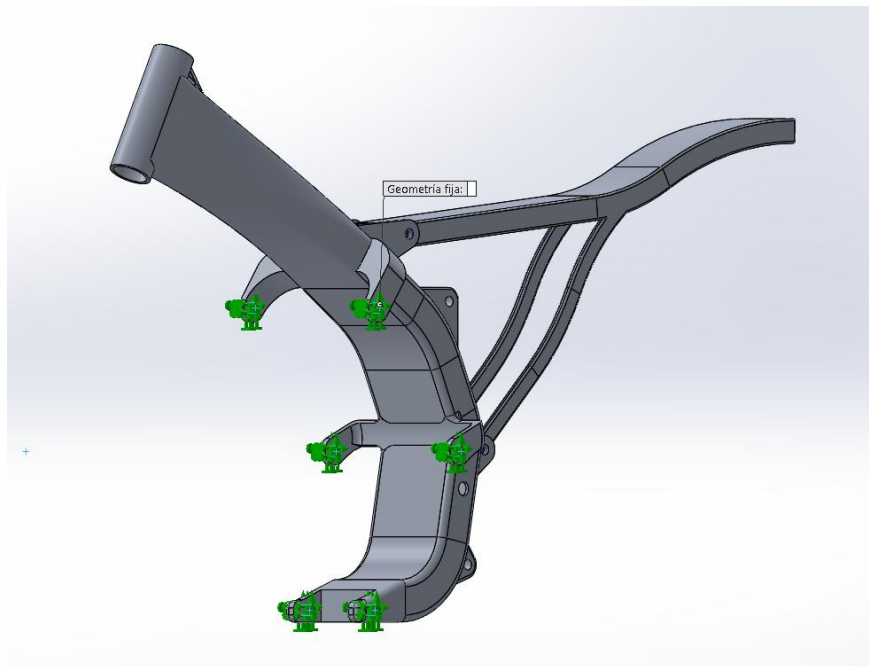
**Figura 116.** Mallado del chasis basado en curvatura con control de malla en los anclajes del amortiguador

### 3. Imposición de restricciones

Las restricciones que se le han impuesto al chasis para el estudio del comportamiento en todos los casos críticos van a ser las mismas siempre. Estas restricciones estarán basadas en la aplicación de unos empotramientos en todos los anclajes del chasis que sirven para sujetar el motor.

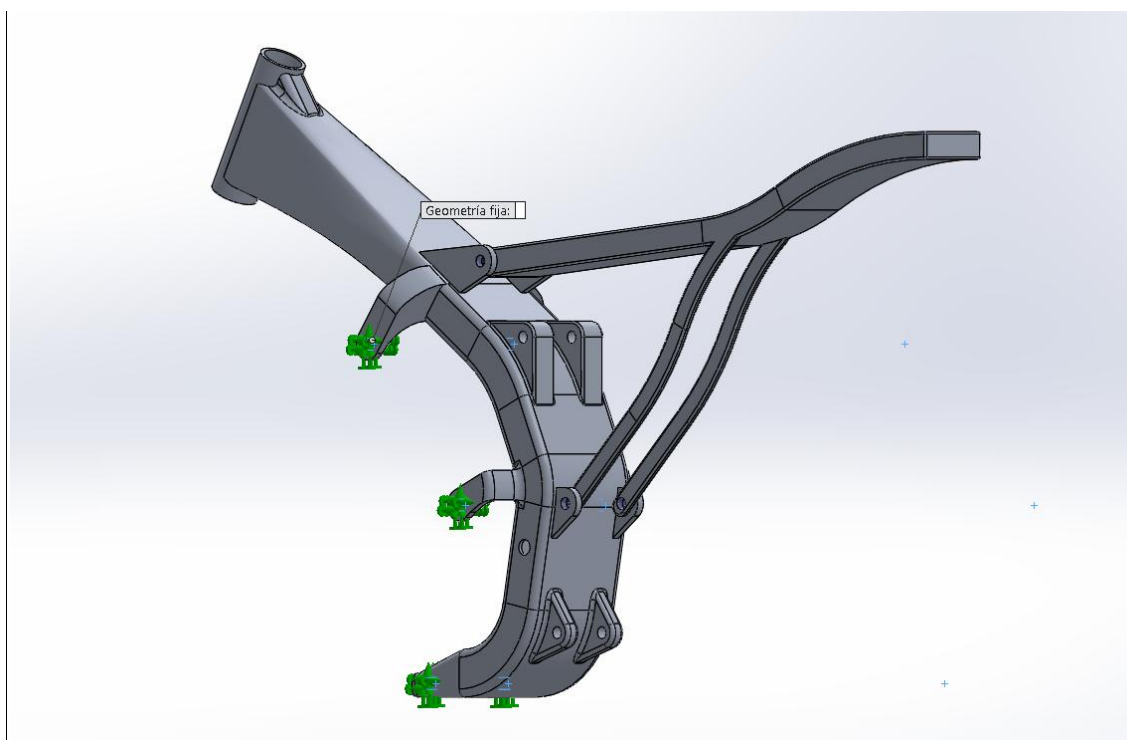
Esto se hace así para simplificar las operaciones, se supone que el bloque motor es un bloque infinitamente rígido e indeformable y entonces se colocan unos empotramientos en esos puntos.

Al situar empotramientos en los anclajes del motor quedan restringidos todos los grados de libertad en dichas piezas, que no pueden realizar ningún desplazamiento, movimiento ni rotación.



**Figura 117.** Imposición de restricciones generales visto de frente





**Figura 118.** Imposición de restricciones generales visto lateralmente



## 4. Aplicación de los esfuerzos

La aplicación de los esfuerzos es algo fundamental para estudiar el comportamiento de la estructura en cada caso crítico. Cada caso crítico concreto que se estudia tiene unos esfuerzos diferentes y estos están repartidos de manera diferente a lo largo del chasis.

El valor de estos esfuerzos y su situación son factores determinantes a la hora de observar el comportamiento en el caso crítico, ya que si variamos mínimamente tanto el valor como la situación del esfuerzo el comportamiento cambiará de manera significativa y ya no se podrá evaluar la estructura de manera adecuada.

Los valores de los esfuerzos utilizados en los estudios de los casos críticos han sido obtenidos del libro “The Racing Motorcycle Volume I, a technical guide for constructors” de John Bradley, y más concretamente del capítulo 5 del mismo. Los valores obtenidos en el libro serán redondeados al alza para asegurar conseguir la construcción de una estructura muy robusta. [3]

## 5. Estudio de los casos críticos

Han sido seleccionadas las situaciones más críticas en el ámbito estructural que puede sufrir una motocicleta para así poder probar su buen comportamiento, ya que si soporta estos esfuerzos de manera correcta sin producirse el fallo se puede concluir que la estructura no fallará si a la motocicleta se le da el uso normal para el que está diseñada. Incluso está diseñada la estructura para soportar esfuerzos superiores a los que aparecerían con un uso normal por si se diera una situación extraordinaria durante su utilización.

Como bien se ha explicado antes el material escogido es el Aluminio 7075 T6, y es con este con el cual se llevarán a cabo los estudios sobre el comportamiento. También cabe destacar que se realizarán con los mallados explicados anteriormente en el punto 2 y con las restricciones impuestas que se han explicado también con anterioridad en el punto 3.

A continuación se va llevar a cabo el estudio estático de los casos críticos elegidos:

### *a) Frenada máxima*

El caso crítico de estudio en este apartado es la frenada máxima, este estudio se realiza suponiendo que la moto está circulando a una elevada velocidad y realiza la máxima frenada repentina que posibilita el sistema de frenado de la moto pero únicamente accionando el freno delantero.

Al realizar una frenada de estas características el chasis soporta unos esfuerzos de gran valor como consecuencia de las considerables deceleraciones que sufre. Se sobredimensiona el valor del estudio para así asegurar que el bastidor no fallará en caso de una situación extraordinaria, que sea un poco más extrema, y garantizar así lo máximo posible la integridad del piloto del vehículo.

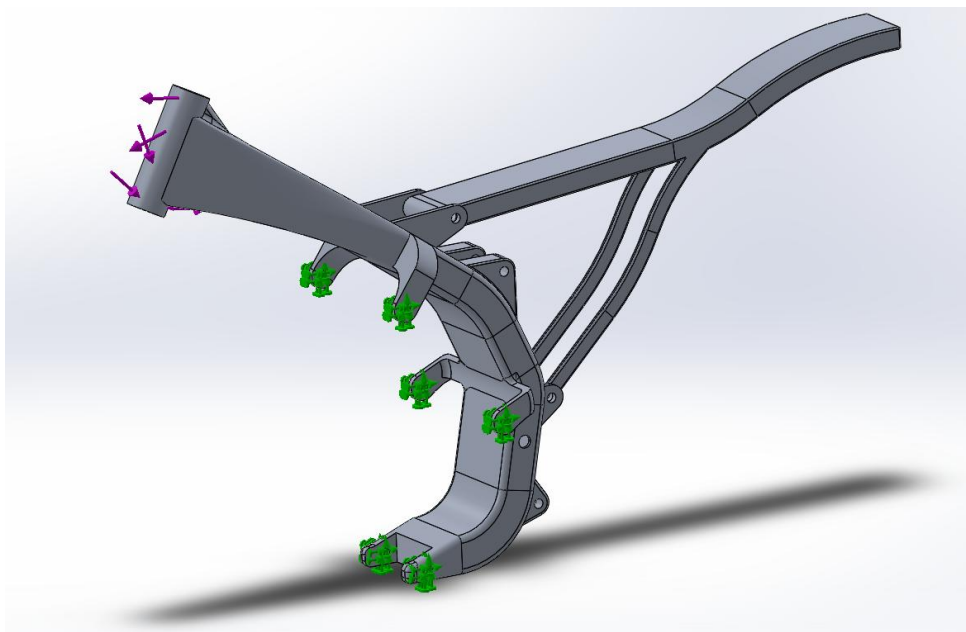
Cuando se da el fenómeno de la frenada la motocicleta tiene una inercia anterior adquirida previamente que tiende a hacer que esta mantenga la velocidad. Entonces al realizar la maniobra de frenada límite la motocicleta apoya prácticamente la totalidad del peso sobre el tren delantero, y en consecuencia sobre la rueda delantera. Por lo tanto, la fuerza de frenado se aplica en el punto de contacto de la rueda delantera con el suelo.

Entonces esta fuerza se transmite a la horquilla delantera, y esta a su vez transmite este esfuerzo al bastidor. Para evaluar el impacto de este esfuerzo en el chasis hay que llevarlo al punto de unión de la suspensión con el bastidor, que es la pipa de la dirección. Simplificando y realizando el traslado de este esfuerzo hasta la pipa queda el siguiente esquema de cómo se va a aplicar el esfuerzo para probar su comportamiento en el caso crítico de frenada máxima, dando al momento  $M$  un valor de  $280 \text{ N}\cdot\text{m}$ .



**Figura 119.** Esquema de la colocación de esfuerzos en frenada máxima

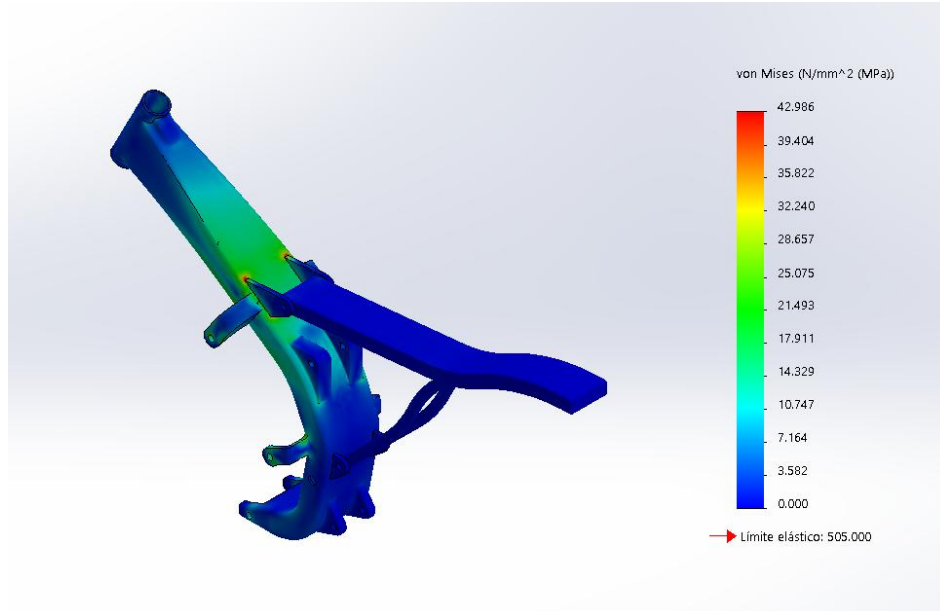
Se lleva a cabo el ensayo con la colocación de este esfuerzo explicado y las restricciones impuestas explicadas anteriormente en el punto 3. Quedando la estructura previa al estudio de la siguiente manera:



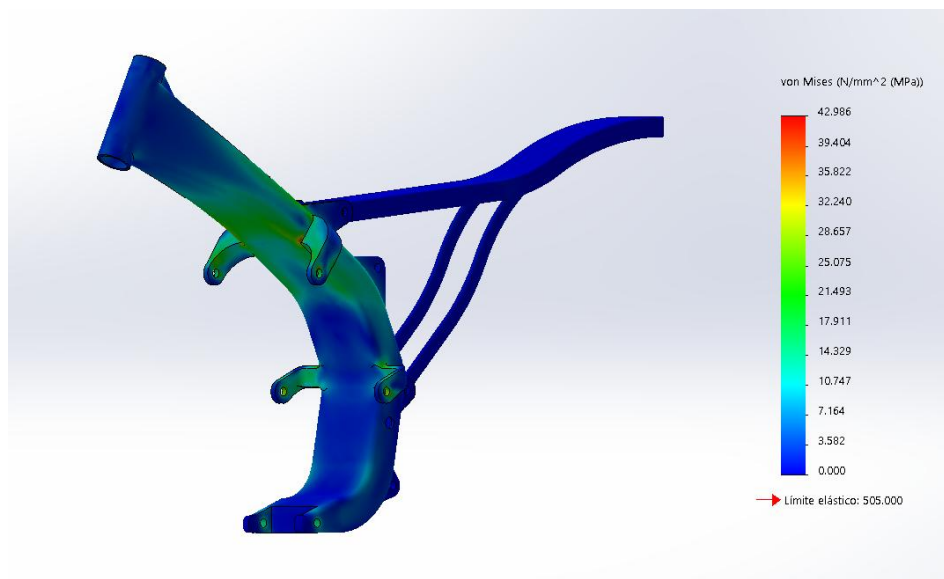
**Figura 120.** Chasis previo a la simulación en el caso de frenada máxima

Tras realizar el estudio se obtienen los siguientes resultados:

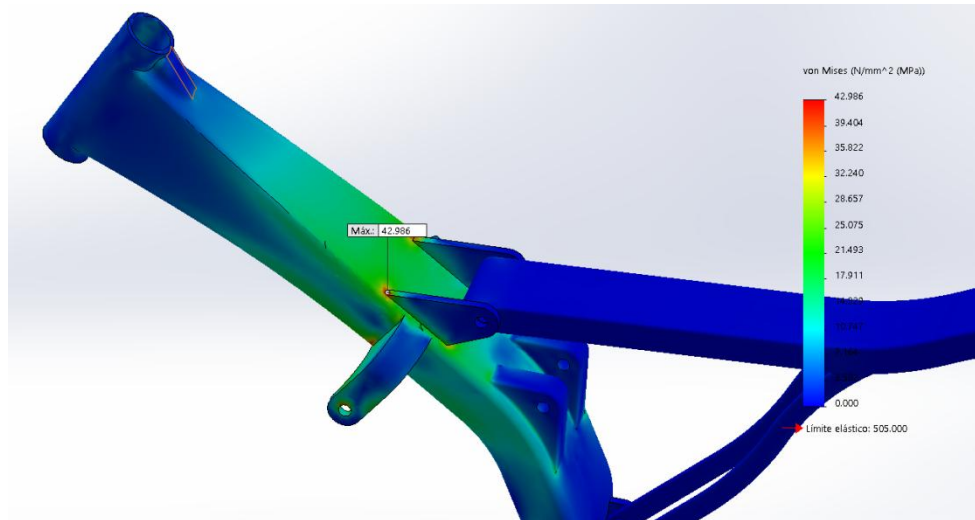
- Tensión de Von Mises



**Figura 121.** Tensiones en el chasis estudio de frenada máxima vista 1



**Figura 122.** Tensiones en el chasis estudio de frenada máxima vista 2

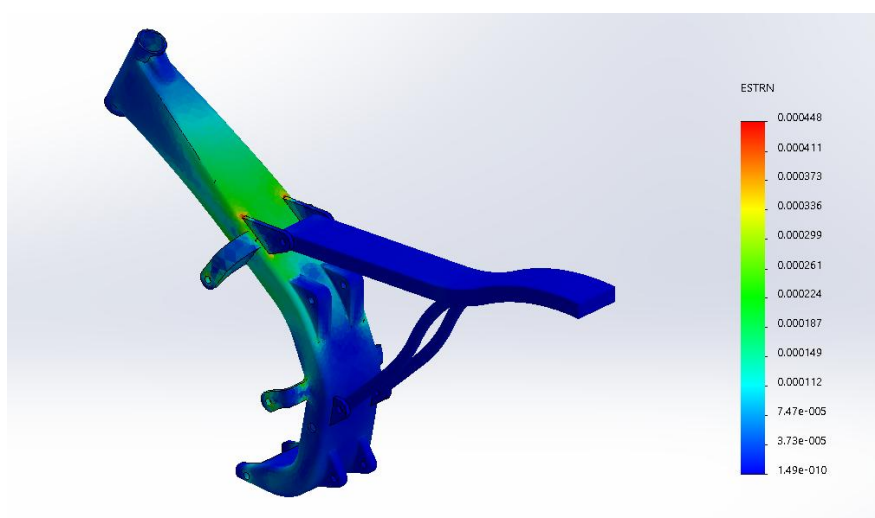


**Figura 123.** Tensión máxima en el chasis estudio de frenada máxima

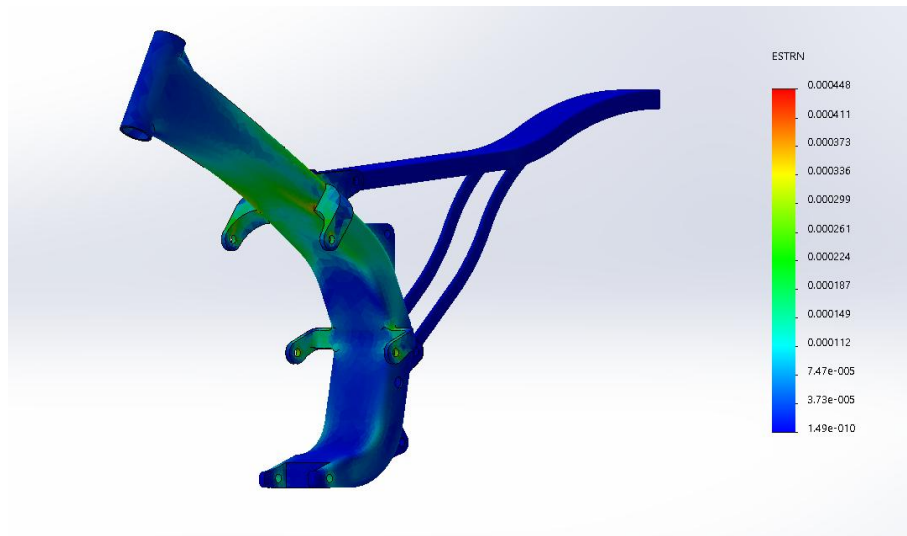
Se puede observar en los gráficos anteriores como la tensión máxima de este caso crítico está muy por debajo del límite elástico. Entonces se demuestra que es totalmente válido el modelo de bastidor para este caso crítico.

La máxima tensión se produce en la unión de algunos anclajes con la estructura principal, no tiene importancia ya que aunque sea la tensión máxima está muy por debajo del límite elástico.

- Deformación



**Figura 124.** Deformación en el chasis estudio de frenada máxima vista 1

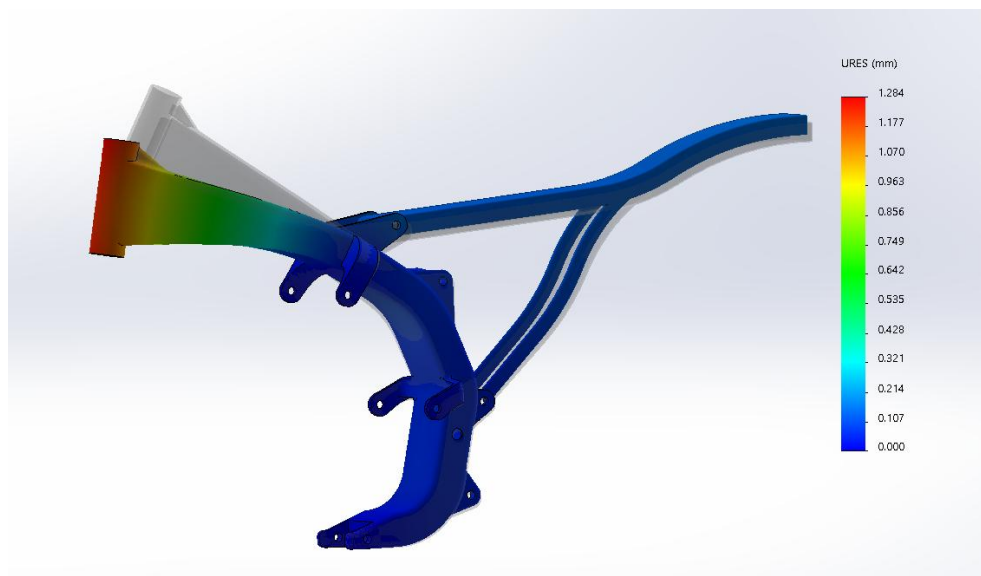


**Figura 125.** Deformación en el chasis estudio de frenada máxima vista 2

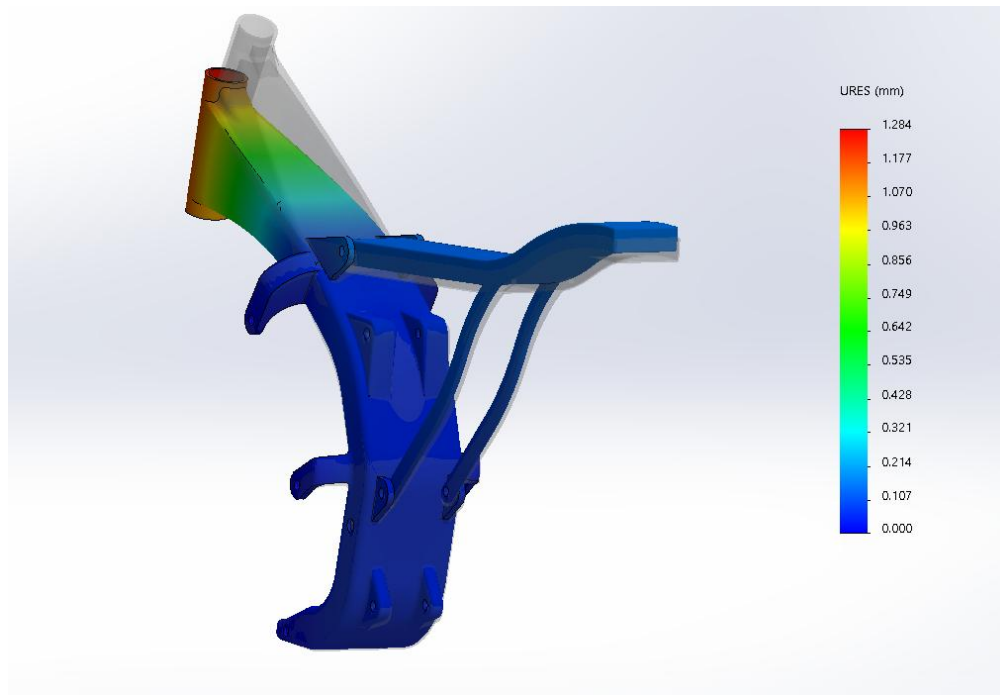
En estos gráficos donde se muestra la deformación que sufre la estructura se puede ver en qué zonas sufrirá mayor deformación la estructura y en cuales menos. Observando también que en las zonas que más se deforman no sufren una deformación importante.

Las máximas deformaciones se producen en las mismas zonas que las tensiones máximas y tampoco tienen importancia ya que su valor es ínfimo.

- Desplazamientos



**Figura 126.** Desplazamiento en el chasis estudio de frenada máxima vista 1



**Figura 127.** Desplazamiento en el chasis estudio de frenada máxima vista 1

En estos gráficos se observa cómo se va a desplazar la estructura al aplicarle el esfuerzo correspondiente. Para poder observar mejor este fenómeno se ha aplicado una escala de deformación 100:1.

El máximo desplazamiento se da en la zona de la pila de la dirección como es lógico debido a que es el punto del chasis por el cual se transmiten los esfuerzos al resto de la estructura.

- Coeficiente de seguridad

Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Automático  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 12

**Figura 128.** FDS en el chasis estudio de frenada máxima

Al observar los gráficos anteriores se podría intuir ya un factor de seguridad elevado. El resultado obtenido es adecuado y cumple con todos los requisitos necesarios, es más está muy por encima del necesario para un buen comportamiento.

## *b) Aceleración máxima*

El caso crítico de estudio en este apartado es la aceleración máxima, este estudio se realiza suponiendo que tiene lugar la máxima aceleración que posibilita la moto y que el suelo sobre el que se está realizando la maniobra tiene una adherencia perfecta. El suelo sobre el que tiene lugar la aceleración influye de manera decisiva, ya que existe una gran diferencia entre realizar una aceleración en un suelo con un alto coeficiente de rozamiento, que al poseer un mejor agarre hará que traccione mejor la rueda tractora, y realizarlo con un suelo con un bajo coeficiente de rozamiento, ya que tendrá un peor agarre y la rueda tractora deslizará más al acelerar.

Las motocicletas son, exceptuando prototipos de investigación, vehículos de tracción trasera. Entonces cuando tiene lugar una aceleración se produce una fuerza en el punto donde apoya la rueda con el suelo, y esta es la responsable de lograr que el vehículo avance.

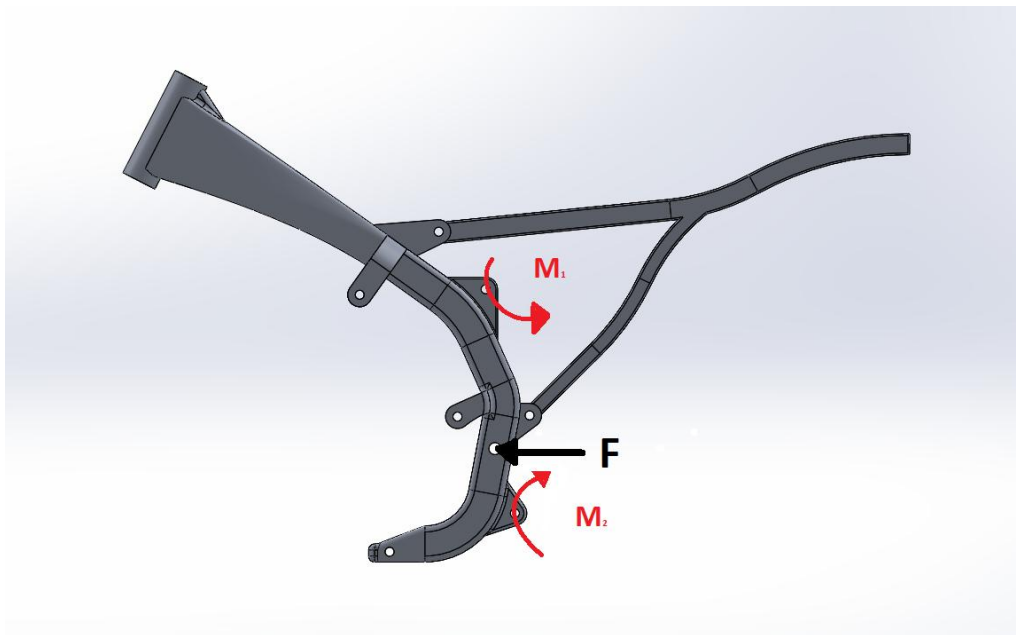
En el caso de estudio concreto de aceleración máxima prácticamente todo el peso del vehículo es soportado por el tren trasero, y más concretamente por la rueda trasera. Esto es debido a que al acelerar la motocicleta quiere rotar alrededor del punto de contacto de la rueda con el suelo y todo el peso se desplaza entonces hacia la parte trasera del vehículo. Esto no quiere decir entonces que la rueda delantera no esté en contacto con el suelo, pero sí que el peso soportado por esta se desprecia.

Para la realización del estudio se conoce que el motor que incorpora la motocicleta cuenta con la potencia suficiente para que la rueda motriz alcance el límite de tracción. También cuenta con unos neumáticos fabricados para poder proporcionar el máximo agarre o adherencia posible.

Al realizar la aceleración en la motocicleta se transmite la fuerza del motor a la rueda por medio de la cadena y de la corona, consiguiendo así que el vehículo avance. Al comenzar a desplazarse la motocicleta aparecen los esfuerzos que intentan hacer a la moto rotar sobre el punto de contacto de la rueda trasera. Es entonces cuando se produce una fuerza en el eje del basculante debido al avance y unos esfuerzos en los anclajes del amortiguador trasero del chasis debido a que el amortiguador está trabajando.

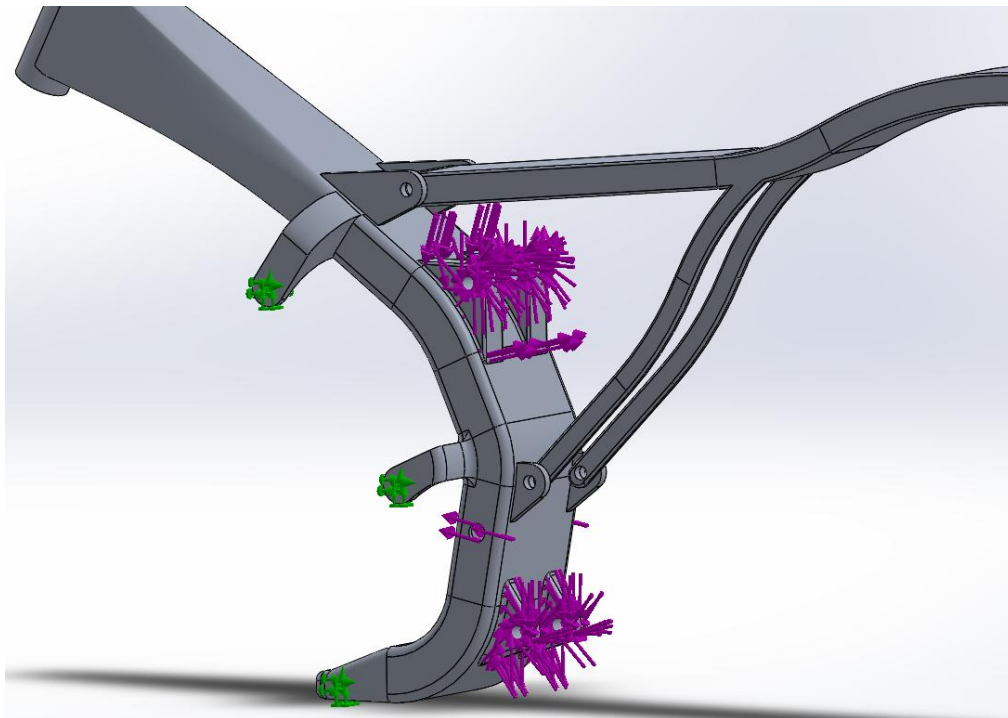
A continuación se muestra un esquema de los esfuerzos aplicados en el estudio de este caso crítico con un valor de  $M_1$  (Anclaje superior) de 350 N·m, un valor de  $F$  de 11.000 N y un valor de  $M_2$  (Anclaje inferior) de 150 N·m.





**Figura 129.** Esquema de la colocación de esfuerzos en aceleración máxima

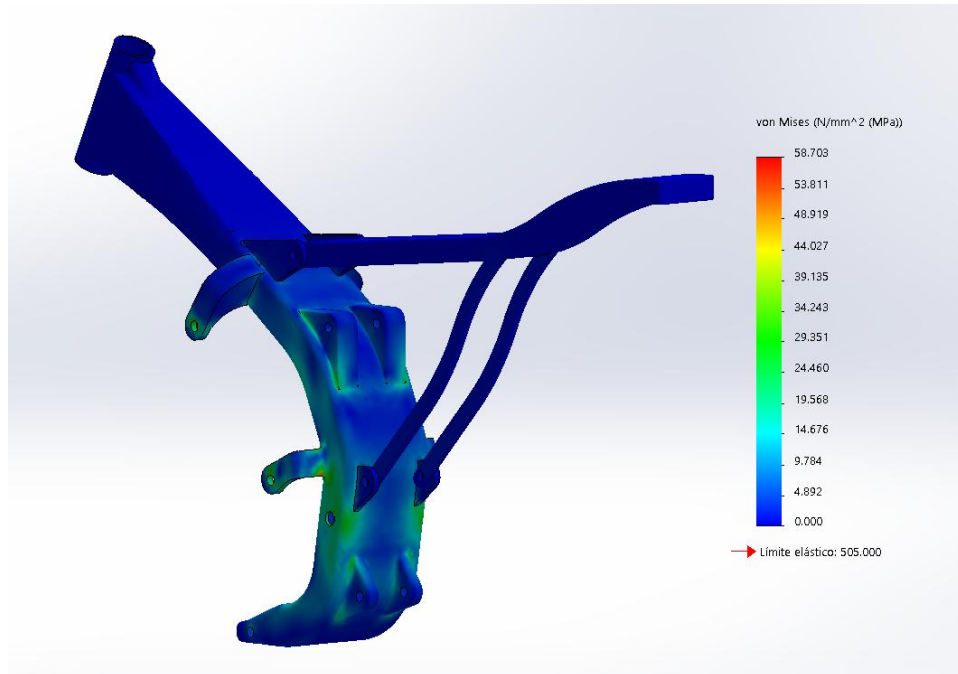
Se lleva a cabo el ensayo con la colocación de estos esfuerzos explicados y las restricciones impuestas explicadas anteriormente en el punto 3. Quedando la estructura previa al estudio de la siguiente manera:



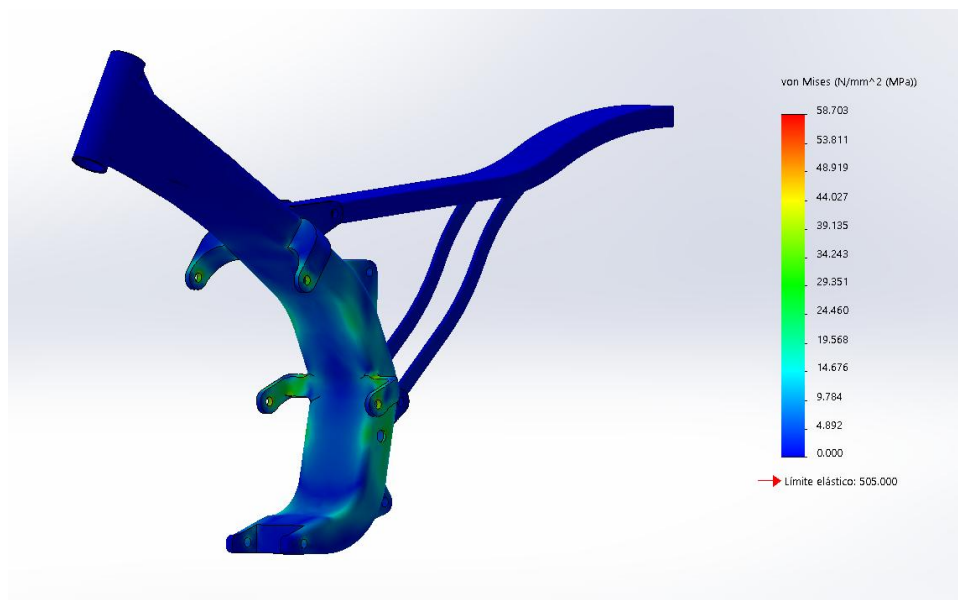
**Figura 130.** Chasis previo a la simulación en el caso de aceleración máxima

Tras realizar el estudio se obtienen los siguientes resultados:

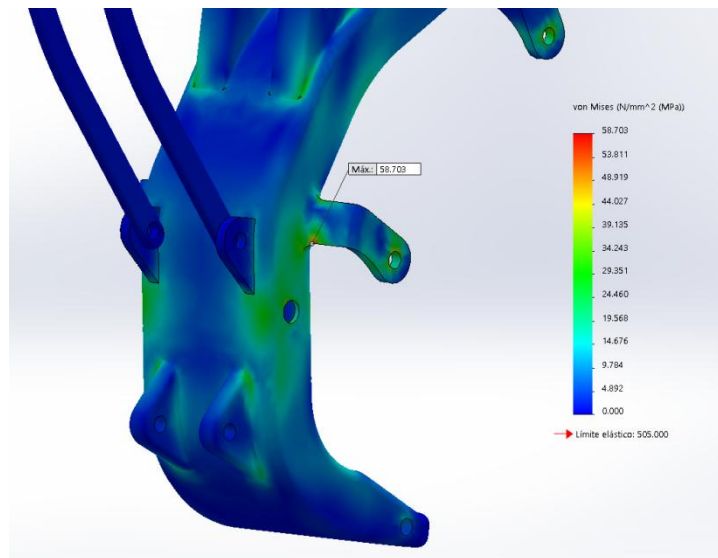
- Tensión de Von Mises



**Figura 131.** Tensiones en el chasis estudio de aceleración máxima vista 1



**Figura 132.** Tensiones en el chasis estudio de aceleración máxima vista 2

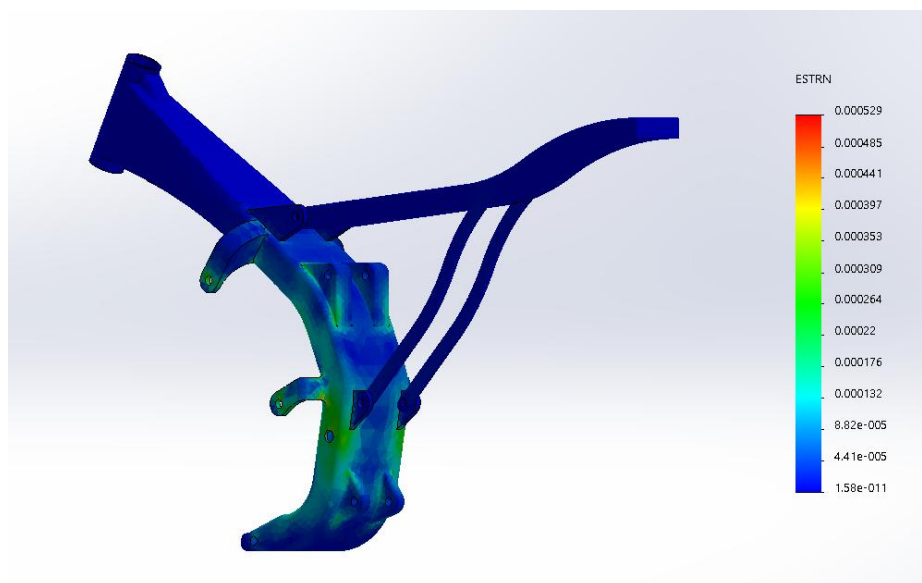


**Figura 133.** Tensión máxima en el chasis estudio de aceleración máxima

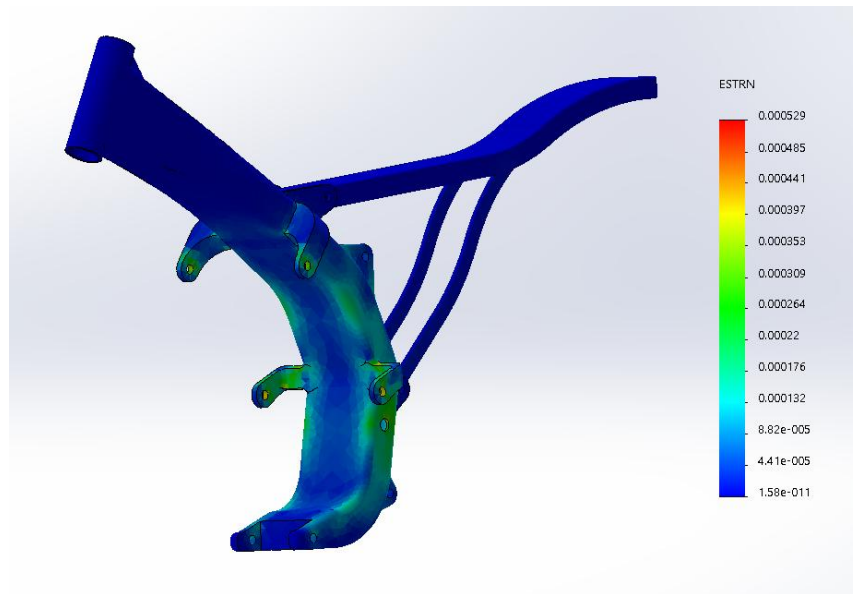
Se puede observar en los gráficos anteriores como la tensión máxima de este caso crítico está también muy por debajo del límite elástico. Entonces se demuestra que es totalmente válido el modelo de bastidor para este caso crítico.

La máxima tensión se produce en la unión de algunos anclajes con la estructura principal, no tiene importancia ya que aunque sea la tensión máxima está muy por debajo del límite elástico.

- Deformación



**Figura 134.** Deformación en el chasis estudio de aceleración máxima vista 1

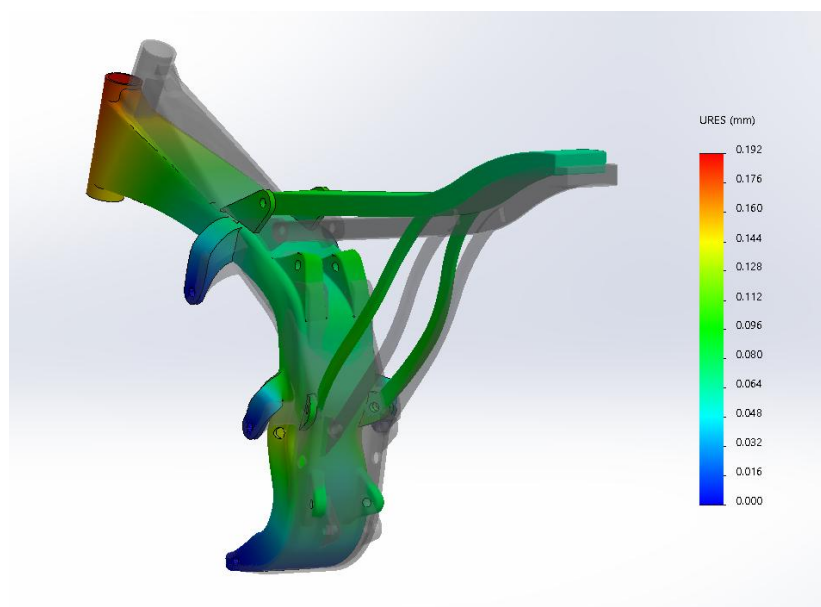


**Figura 135.** Deformación en el chasis estudio de aceleración máxima vista 2

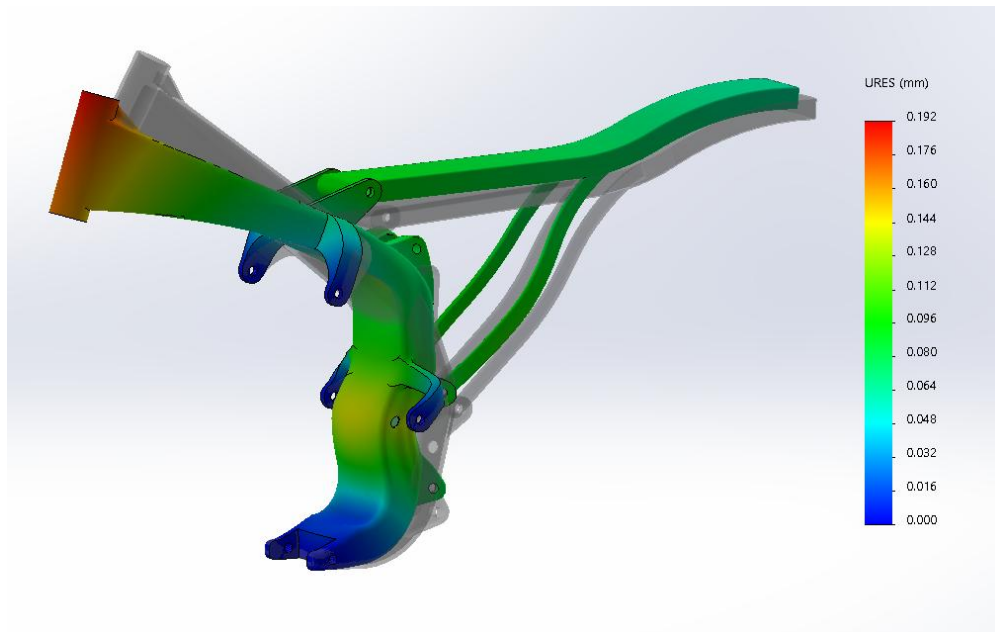
En estos gráficos donde se muestra la deformación de la estructura se puede ver en qué zonas sufrirá mayor deformación la estructura y en cuáles menos. Observando también que en las zonas que más se deforman no sufren una deformación importante.

Las máximas deformaciones se producen en las mismas zonas que las tensiones máximas y tampoco tienen importancia ya que su valor es ínfimo.

- Desplazamientos



**Figura 136.** Desplazamiento en el chasis estudio de aceleración máxima vista 1



**Figura 137.** Desplazamiento en el chasis estudio de aceleración máxima vista 2

En estos gráficos se observa cómo se va a desplazar la estructura al aplicarle el esfuerzo correspondiente. Para poder observar mejor este fenómeno se ha aplicado una escala de deformación 600:1.

El máximo desplazamiento se da en la zona de la pipa de la dirección consecuencia del desplazamiento hacia el interior de la parte inferior de la estructura central que al adelantarse con respecto de su posición original levanta la pipa de la dirección.

- Coeficiente de seguridad

Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Automático  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 8.6

**Figura 138.** FDS en el chasis estudio de aceleración máxima

Al observar los resultados se puede apreciar que el resultado obtenido es adecuado y cumple con todos los requisitos necesarios, es más se obtienen también unos resultados muy por encima de los necesarios para que la estructura tenga un buen comportamiento.

### *c) Paso por curva*

El caso crítico de estudio en este apartado es el paso por curva, este estudio se realiza suponiendo que tiene lugar el trazado de una curva cuando la motocicleta lleva una elevada velocidad y el piloto tiene que inclinar la motocicleta un ángulo considerable para realizar un correcto trazado.

Este estudio se lleva a cabo tomando el caso más desfavorable posible. La aceleración centrífuga máxima se consigue con la mayor velocidad posible con la que se puede recorrer una curva de radio constante. Para que una motocicleta pueda tomar una curva se necesita alcanzar un cierto ángulo de inclinación para que el peso de la moto equilibre las fuerzas producidas por efectos giroscópicos en las ruedas, las fuerzas producidas en partes del motor en movimiento y las fuerzas de la aceleración centrífuga.

Para poder trazar una curva de radio constante a una velocidad uniforme es necesario un cierto ángulo de inclinación con la vertical. Este ángulo de inclinación es función de la velocidad y del radio de la curva a su vez. También hay que tener en cuenta a la hora de tomar una curva la resistencia aerodinámica que presenta la motocicleta al llevar una cierta velocidad. Esta resistencia aerodinámica aumenta con el cuadrado de la velocidad.

Hay que tener presente que cuanto menor sea el radio de curvatura que se traza mayor será el ángulo de las fuerzas con respecto a la componente normal a la trayectoria en los puntos donde se aplica. Entonces cuanto mayor ángulo más grande será el momento producido con respecto al eje perpendicular al suelo en los puntos de contacto.

Para este caso de estudio en particular se va a suponer que la motocicleta se inclina aproximadamente un 50% para afrontar el paso por curva. Se escoge este ángulo ya que es una situación bastante extrema para el tipo de motocicleta para el que se está realizando el estudio.

Se va a considerar que los mayores esfuerzos que va a soportar la motocicleta al realizar un paso por curva van a estar concentrados en el tren delantero del vehículo, despreciando los esfuerzos menores que puedan aparecer en el tren trasero. Estos esfuerzos en el tren delantero se producen debido a la inclinación que toma la moto y a la compresión que sufre la horquilla de la suspensión delantera al tomar la curva.

Cuanto mayor sea la velocidad y el radio de la curva menor será la componente de la fuerza que provoca el esfuerzo y una gran proporción generará un momento en el eje longitudinal del vehículo que estará absorbido por la pipa de la dirección y desde esa parte del bastidor repartido al resto de la estructura.

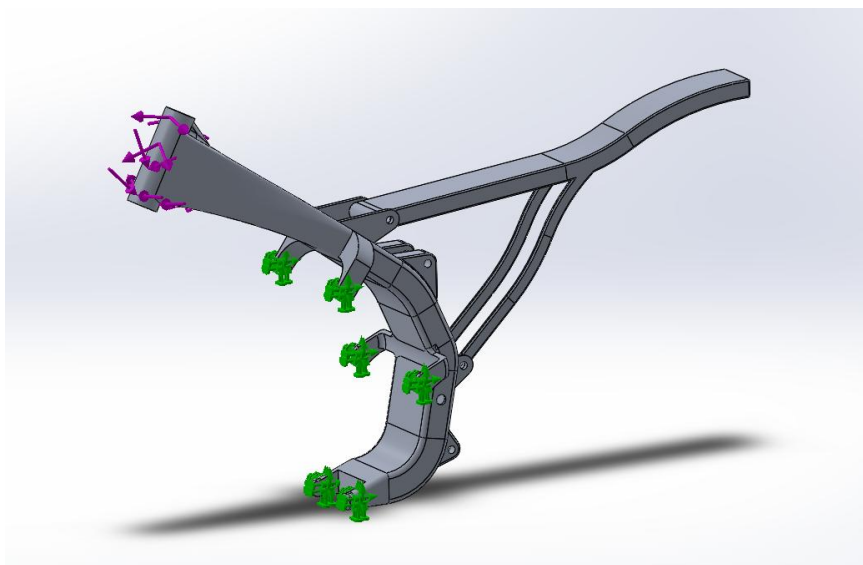
Se van a estudiar los esfuerzos aplicados en la pipa de la dirección, que llegan a esta por medio de la horquilla y que a esta a su vez provienen del punto de contacto del neumático con el suelo.

A continuación se muestra un esquema de los esfuerzos aplicados en el estudio de este caso crítico con un valor de  $M_1$  (pintado en rojo) de 200 N·m y un valor de  $M_2$  (pintado en negro) de 450 N·m.



**Figura 139.** Esquema de la colocación de esfuerzos en paso por curva

Se lleva a cabo el ensayo con la colocación de estos esfuerzos explicados y las restricciones impuestas explicadas anteriormente en el punto 3. Quedando la estructura previa al estudio de la siguiente manera:

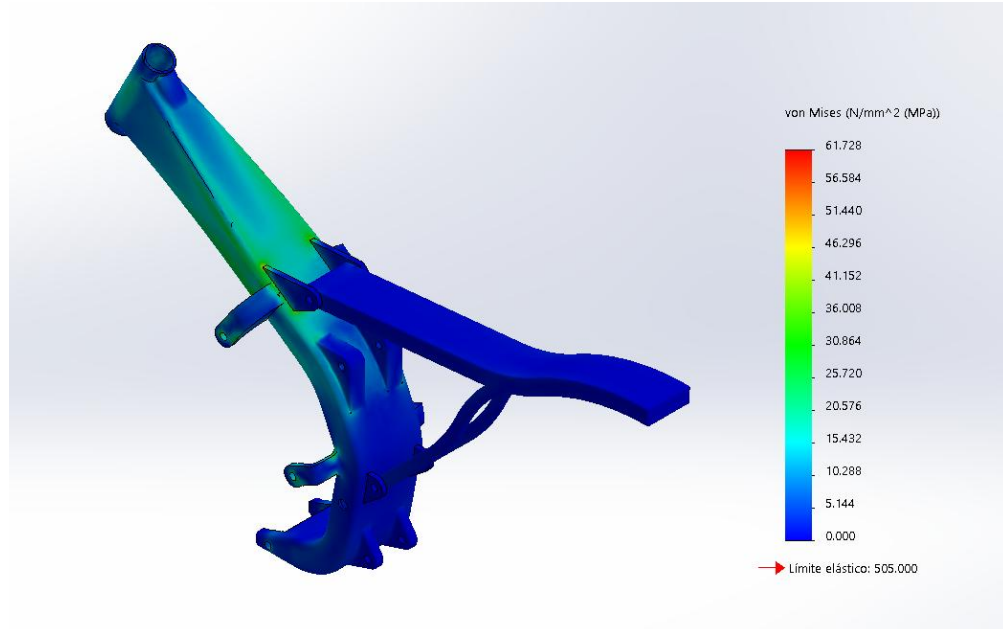


**Figura 140.** Chasis previo a la simulación en el caso de paso por curva

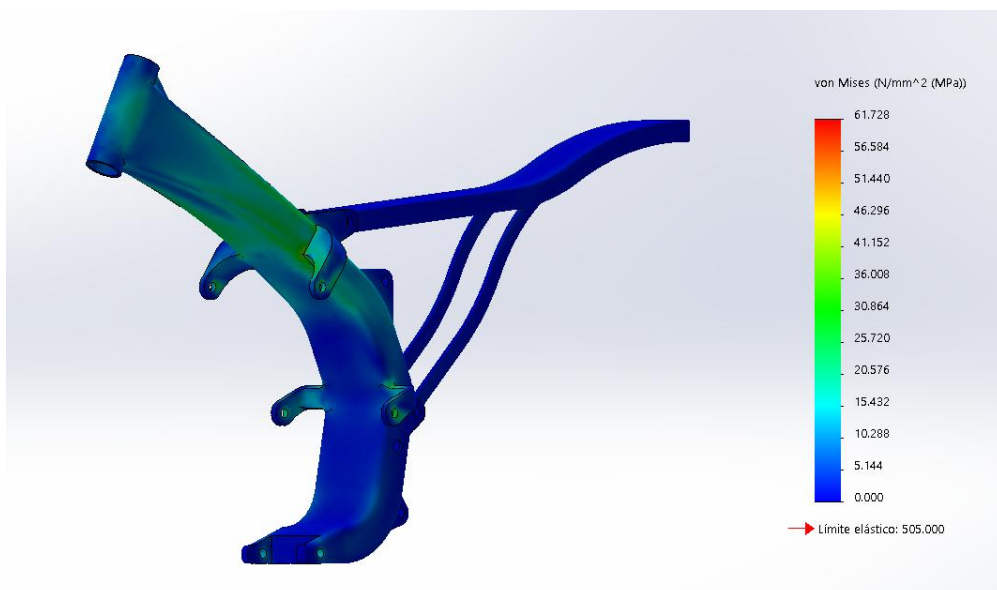


Tras realizar el estudio se obtienen los siguientes resultados:

- Tensión de Von Mises

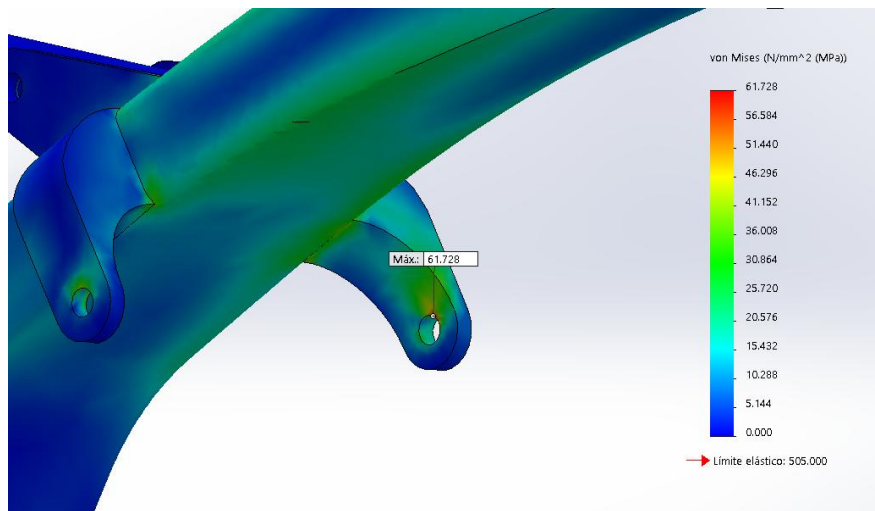


**Figura 141.** Tensiones en el chasis estudio de paso por curva vista 1



**Figura 142.** Tensiones en el chasis estudio de paso por curva vista 2



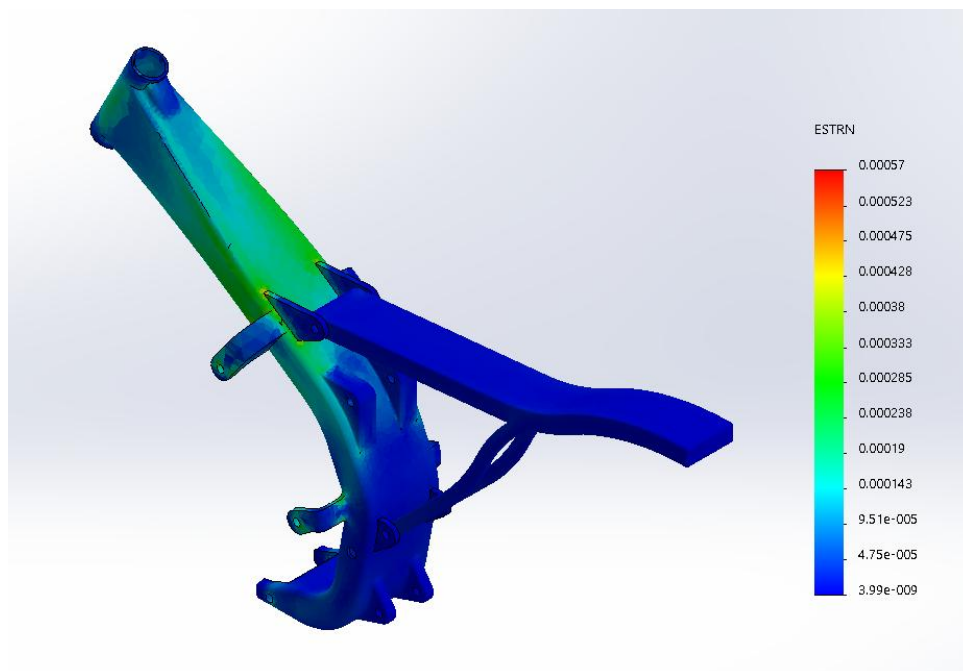


**Figura 143.** Tensión máxima en el chasis estudio de paso por curva

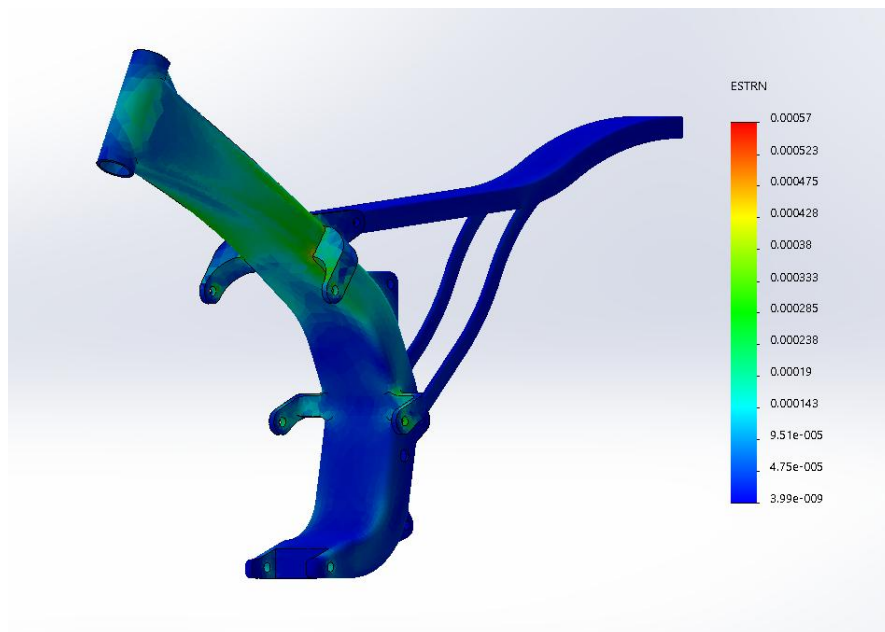
Se puede observar en los gráficos anteriores como la tensión máxima de este caso crítico también está muy por debajo del límite elástico. Entonces se demuestra que es totalmente válido el modelo de bastidor para este caso crítico.

La máxima tensión se produce en los primeros anclajes de la estructura que sujetan al motor, no tiene importancia ya que aunque sea la tensión máxima está muy por debajo del límite elástico.

- Deformación



**Figura 144.** Deformación en el chasis estudio de paso por curva vista 1

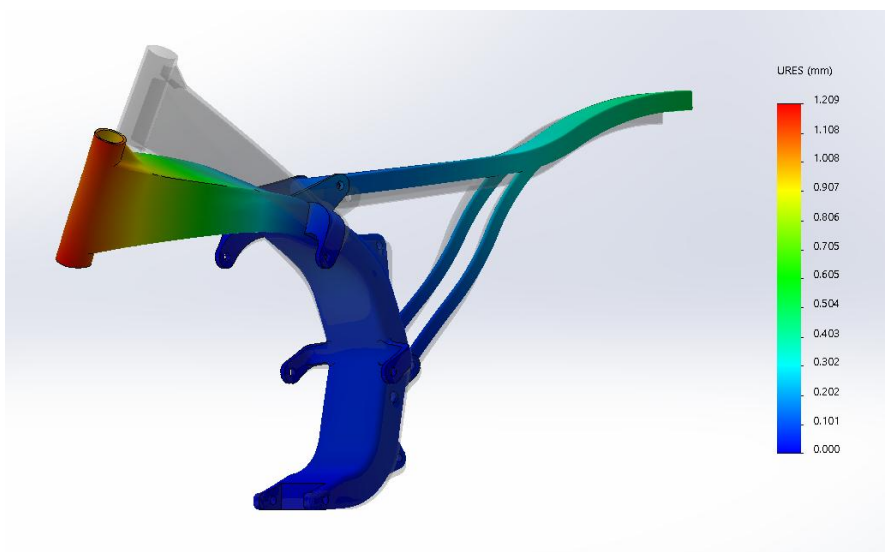


**Figura 145.** Deformación en el chasis estudio de paso por curva vista 2

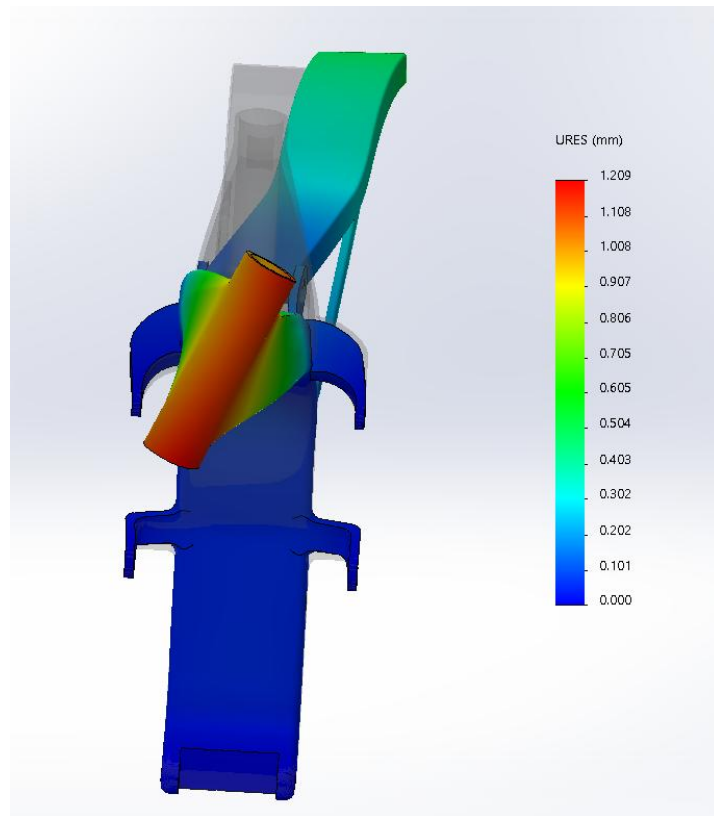
En estos gráficos donde se muestra la deformación sufrida por la estructura se puede ver en qué zonas sufrirá mayor deformación la estructura y en cuales menos. Observando también que en las zonas que más se deforman no sufren una deformación importante.

Las máximas deformaciones se producen en zonas muy cercanas a donde se producen las tensiones máximas y tampoco tienen importancia ya que su valor es ínfimo.

- Desplazamientos



**Figura 146.** Desplazamiento en el chasis estudio de paso por curva vista 1



**Figura 147.** Desplazamiento en el chasis estudio de paso por curva vista 2

En estos gráficos se observa cómo se va a desplazar la estructura al aplicarle el esfuerzo correspondiente. Para poder observar mejor este fenómeno se ha aplicado una escala de deformación 200:1.

El máximo desplazamiento se da en la zona de la pipa de la dirección consecuencia de los esfuerzos aplicados en dicho punto para el estudio, que la levantan y la retuercen.

- Coeficiente de seguridad

Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Automático  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 8.2

**Figura 148.** FDS en el chasis estudio de paso por curva

Al observar los resultados se puede apreciar que el resultado obtenido es adecuado y cumple con todos los requisitos necesarios, es más se obtienen también unos resultados muy por encima de los necesarios para un buen comportamiento.

#### *d) Salto cayendo primero con la rueda delantera*

El caso crítico de estudio en este apartado es el salto de altura cayendo con la motocicleta apoyando primero la rueda delantera, este estudio se realiza suponiendo que la motocicleta lleva una velocidad considerable y se encuentra con un montículo que al pasarlo a esa velocidad realiza un salto de considerable altitud.

Este estudio se lleva a cabo tomando el caso más desfavorable posible. El caso más normal al caer con la motocicleta es caer apoyando primero la rueda trasera, pero esto no siempre es así y hay casos en los que la primera rueda al apoyar al caer tras realizar un salto es la rueda delantera.

En este caso en el que se apoya primero la rueda delantera al caer desde una cierta altura, hay que tener en cuenta la gran compresión que sufrirá la amortiguación delantera cuando la moto tome contacto con el suelo, ya que soportará la masa de la motocicleta y del piloto cayendo desde unos metros de altura.

Se va a considerar entonces que los mayores esfuerzos que va a soportar la motocicleta al realizar este salto van a estar concentrados en el tren delantero del vehículo. Los esfuerzos van a llegar al chasis por medio de la pipa de la dirección, y a esta a su vez llegan por medio de la horquilla. Estos llegan a la horquilla desde la rueda, que es en esta, exactamente en el punto de contacto de la rueda con el suelo, donde se producen los esfuerzos.

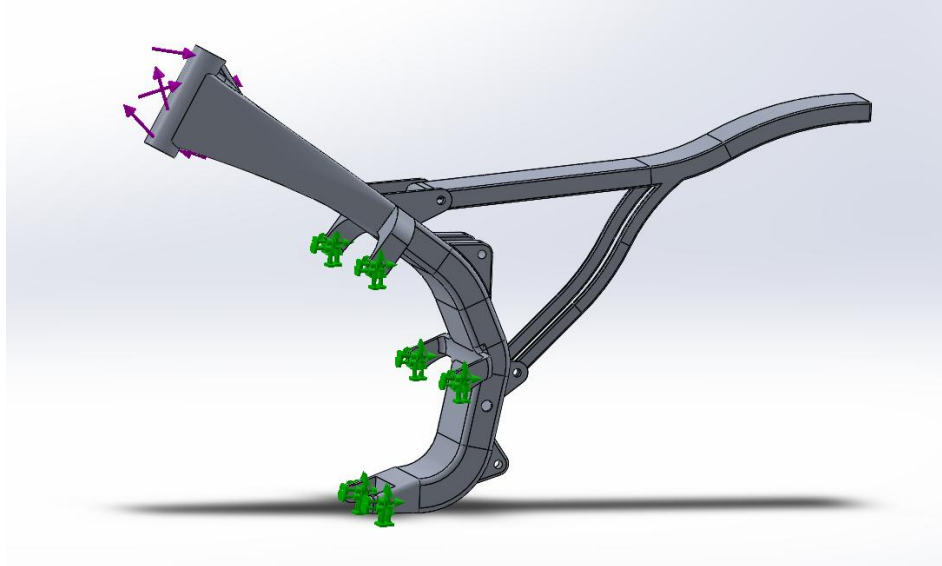
Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea la altura del salto mayor será el esfuerzo que el bastidor tendrá que soportar. También a mayor velocidad previa al salto, mayor altura se alcanzará en el salto, y por lo tanto mayor será el esfuerzo a soportar por el bastidor.

A continuación se muestra un esquema de los esfuerzos aplicados en el estudio de este caso crítico con un valor de  $M$  de  $2500 \text{ N}\cdot\text{m}$



**Figura 149.** Esquema de la colocación de esfuerzos en salto delantero

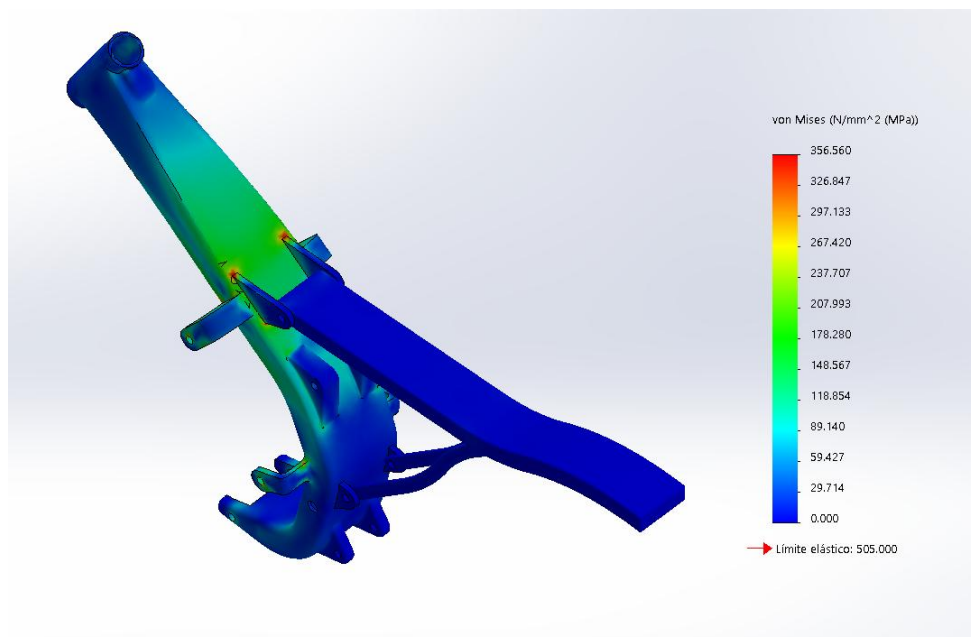
Se lleva a cabo el ensayo con la colocación de estos esfuerzos explicados y las restricciones impuestas explicadas anteriormente en el punto 3. Quedando la estructura previa al estudio de la siguiente manera:



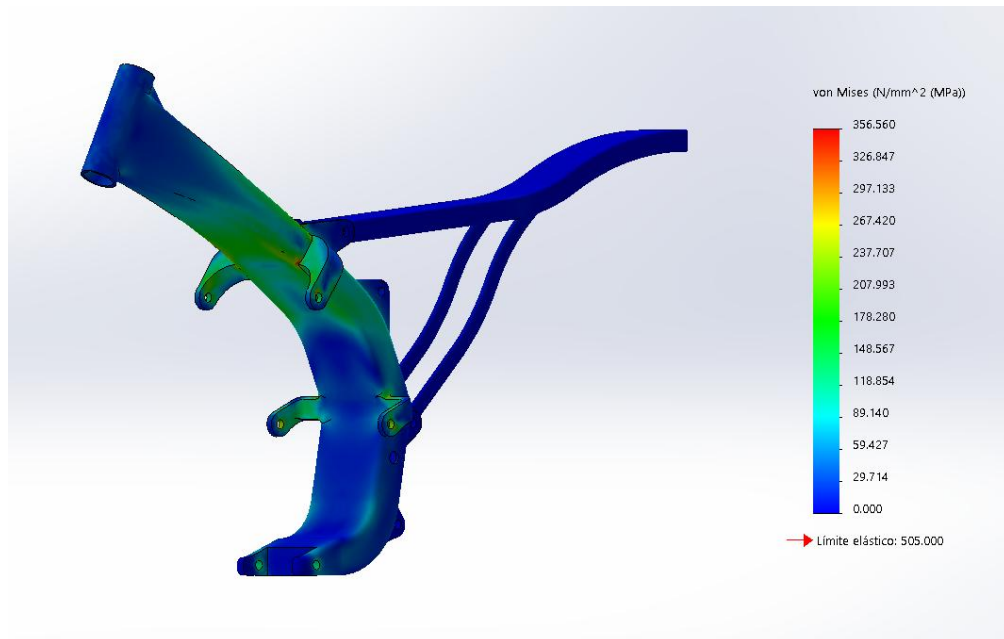
**Figura 150.** Chasis previo a la simulación en el caso de salto delantero

Tras realizar el estudio se obtienen los siguientes resultados:

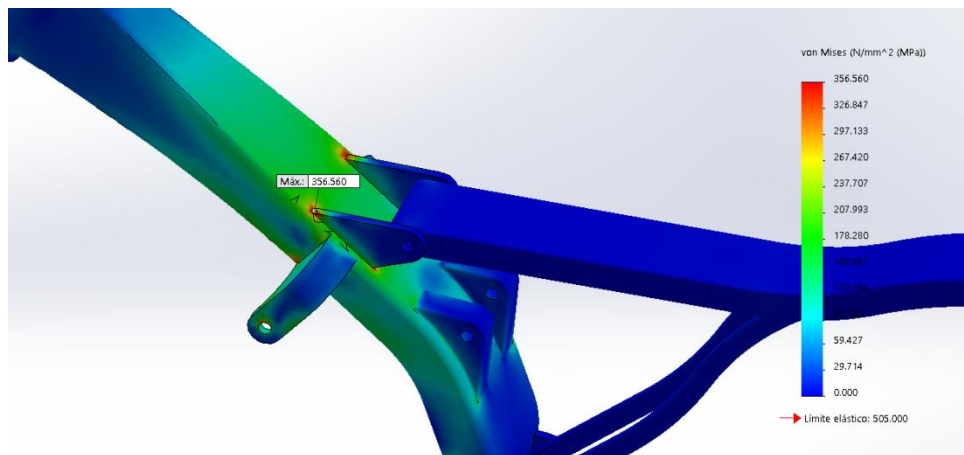
- Tensión de Von Mises



**Figura 151.** Tensiones en el chasis estudio de salto delantero vista 1



**Figura 152.** Tensiones en el chasis estudio de salto delantero vista 2

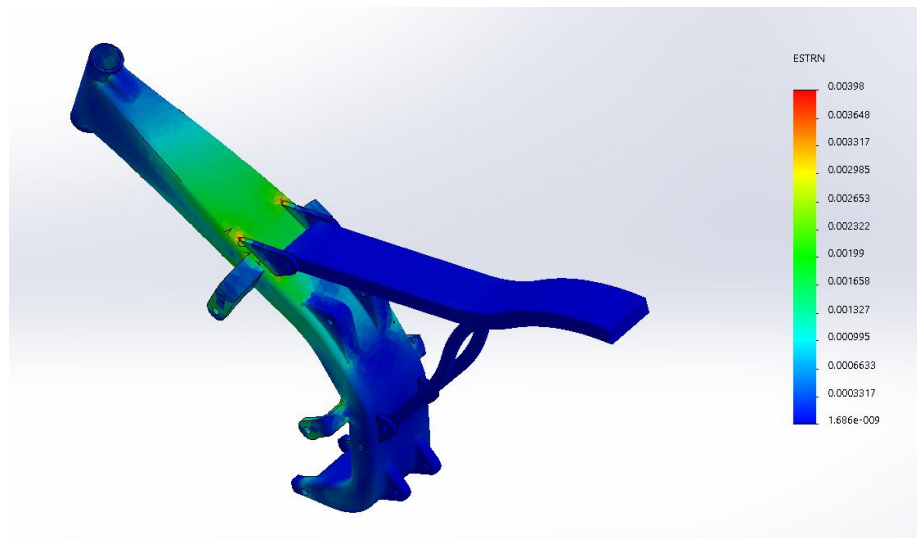


**Figura 153.** Tensión máxima en el chasis estudio de salto delantero

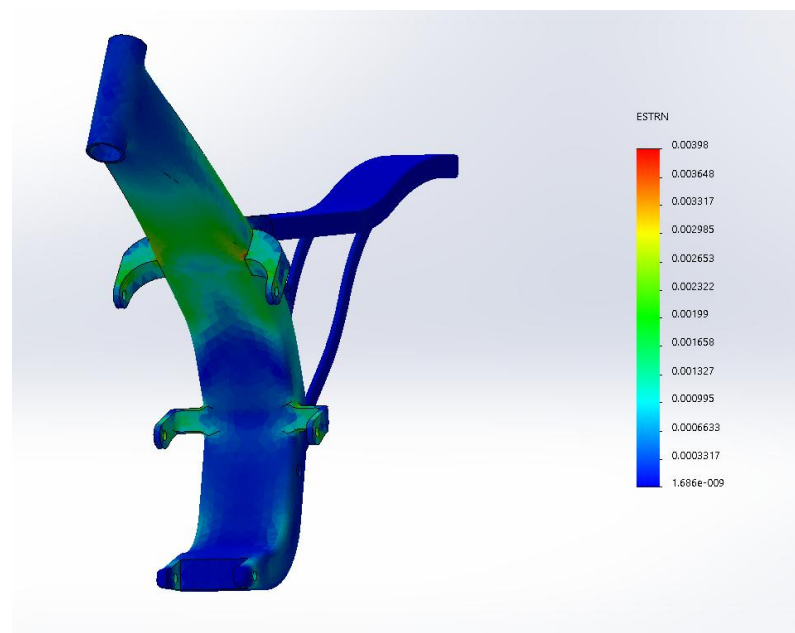
Se puede observar en los gráficos anteriores como la tensión máxima de este caso crítico está por debajo del límite elástico, pero ya no está tan lejana como en los casos de estudio previos. Esto se debe a los grandes esfuerzos que tiene que soportar el bastidor cuando vuelve a tomar contacto con el suelo tras realizar un salto. Se observa que aunque el valor de la tensión máxima es alto el comportamiento de la estructura ante esta situación será totalmente correcto y no se producirá el fallo.

La máxima tensión se produce en la unión de algunos anclajes con la estructura principal, estos anclajes han sido reforzados previamente para asegurar que no se producirá una rotura bajo unas condiciones de uso normal. Cabe destacar que al concentrarse tanto la tensión máxima en pocos puntos concretos también puede ser debido a la inexactitud ocasional del software y es posible que la tensión máxima no tenga un valor tan alto y esté más repartida por las zonas próximas a los puntos.

- Deformación



**Figura 154.** Deformación en el chasis estudio de salto delantero vista 1



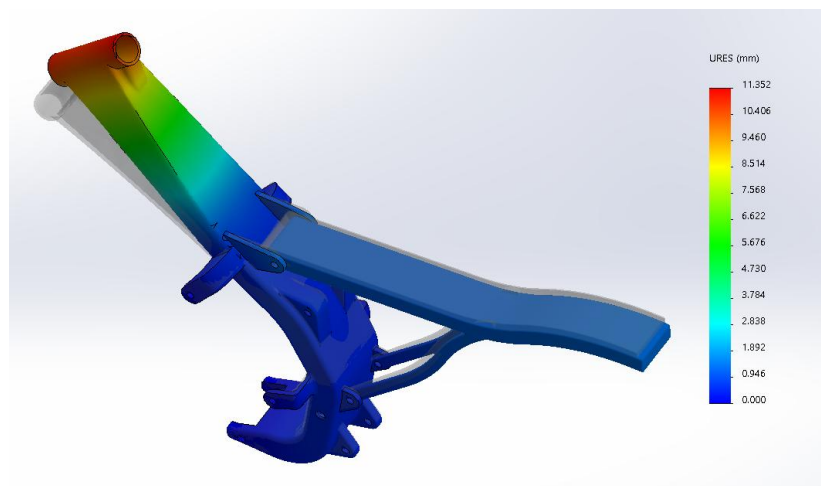
**Figura 155.** Deformación en el chasis estudio de salto delantero vista 2



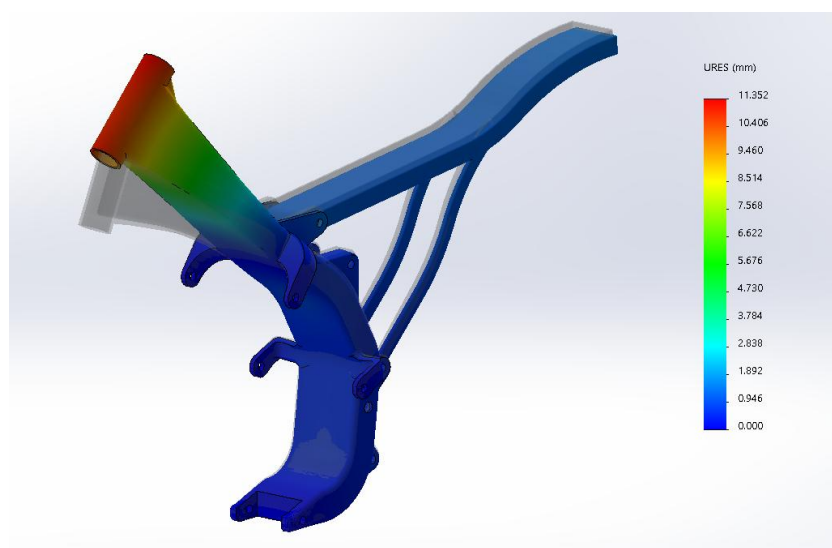
En estos gráficos donde se muestra la deformación que sufre la estructura se puede ver en qué zonas sufrirá mayor deformación la estructura y en cuales menos. Observando también que en las zonas que más se deforman no sufren una deformación trascendente aunque sí bastante superior que en los casos estudiados anteriormente.

Las máximas deformaciones se producen en las mismas zonas que donde se producen las tensiones máximas.

- Desplazamientos



**Figura 156.** Desplazamiento en el chasis estudio de salto delantero vista 1



**Figura 157.** Desplazamiento en el chasis estudio de salto delantero vista 2



En estos gráficos se observa cómo se va a desplazar la estructura al aplicarle el esfuerzo correspondiente. Para poder observar mejor este fenómeno se ha aplicado una escala de deformación 13:1.

El máximo desplazamiento se da en la zona de la pipa de la dirección consecuencia de los esfuerzos aplicados en dicho punto para el estudio, que la hacen levantarse.

- Coeficiente de seguridad

Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Automático  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 1.4

**Figura 158.** FDS en el chasis estudio de salto delantero

Al observar los resultados anteriores ya se esperaba un resultado del fds como el obtenido. El resultado obtenido es menor que en los casos de estudio anteriores pero sigue siendo adecuado y cumple con todos los requisitos necesarios, por lo que se asegura que la estructura tendrá un buen comportamiento.

### *e) Salto cayendo primero con la rueda trasera*

El caso crítico de estudio en este apartado es el salto de altura cayendo con la motocicleta apoyando primero la rueda trasera, este estudio se realiza suponiendo que la motocicleta lleva una velocidad considerable y se encuentra con un montículo que al pasarlo a esa velocidad realiza un salto de considerable altitud.

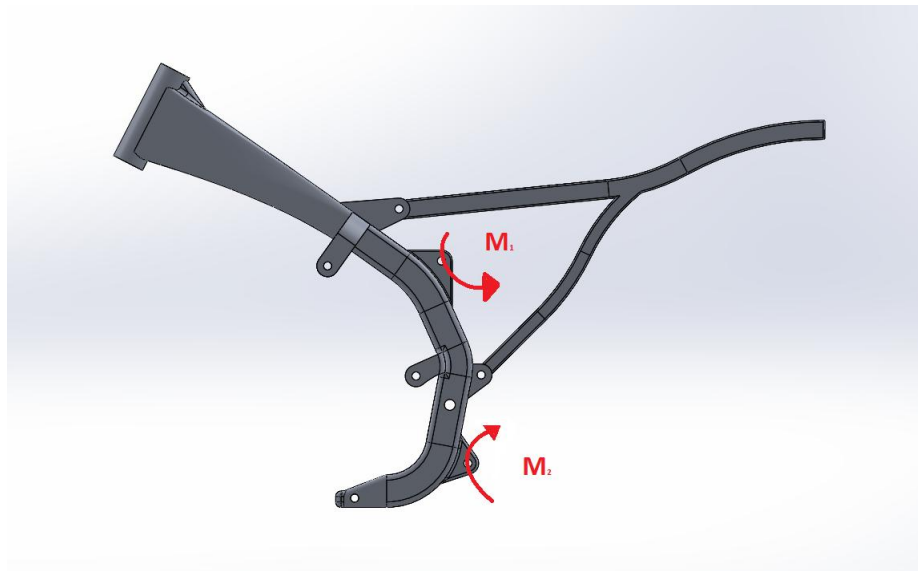
Este estudio se lleva a cabo tomando el caso más desfavorable posible. El caso más común al caer con la motocicleta es tomar tierra apoyando primero la rueda trasera y este es el caso de estudio que se va a llevar a cabo ahora.

En este caso en el que se apoya primero la rueda trasera al caer desde una cierta altura, hay que tener en cuenta la gran compresión que sufrirá la amortiguación trasera cuando la moto tome contacto con el suelo, ya que soportará la masa de la motocicleta y del piloto cayendo desde unos metros de altura.

Se va a considerar entonces que los mayores esfuerzos que va a soportar la motocicleta al realizar este salto van a estar concentrados en el tren trasero del vehículo. Los esfuerzos van a llegar al chasis por medio de los anclajes de la amortiguación trasera, y a esta a su vez llegan por medio del amortiguador trasero. Estos llegan al amortiguador trasero desde la rueda, que es en esta, exactamente en el punto de contacto de la rueda con el suelo, donde se producen los esfuerzos.

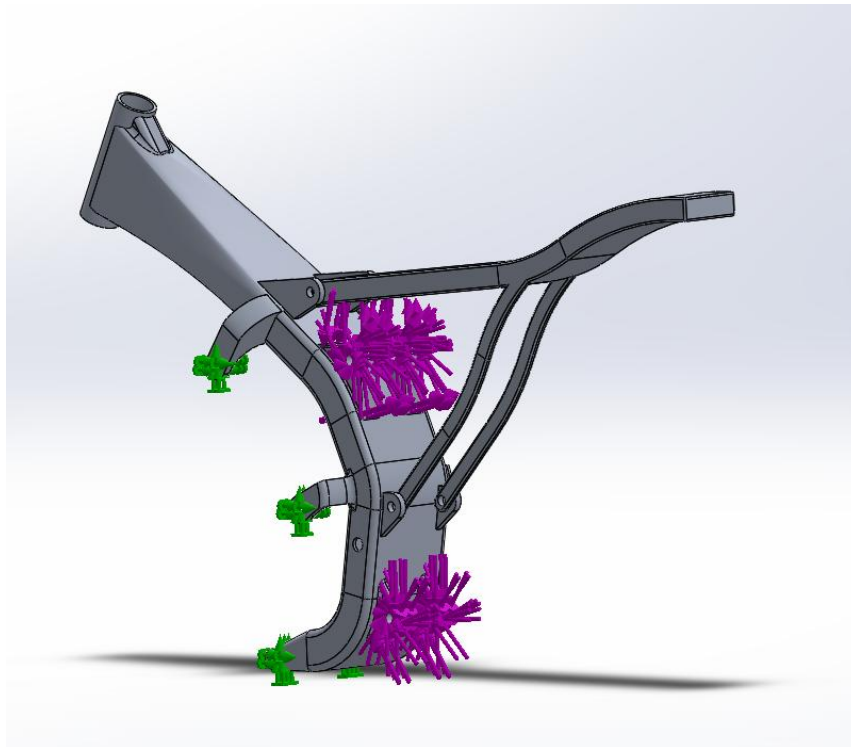
Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea la altura del salto mayor será el esfuerzo que el bastidor tendrá que soportar. También a mayor velocidad previa al salto, mayor altura se alcanzará en el salto, y por lo tanto mayor será el esfuerzo para el bastidor.

A continuación se muestra un esquema de los esfuerzos aplicados en el estudio de este caso crítico con un valor de  $M_1$  (Anclaje superior) de 2900 N·m y un valor de  $M_2$  (Anclaje inferior) de 1650 N·m.



**Figura 159.** Esquema de la colocación de esfuerzos en salto trasero

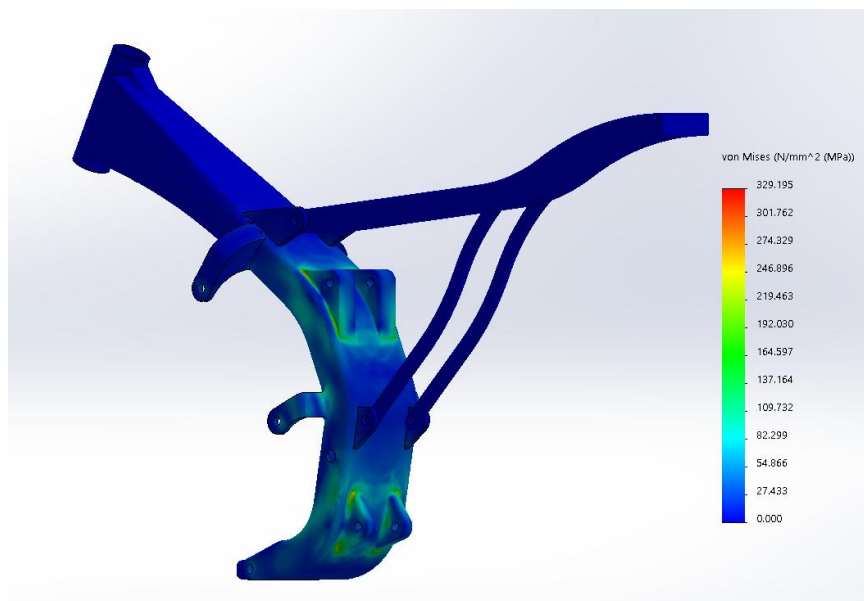
Se lleva a cabo el ensayo con la colocación de estos esfuerzos explicados y las restricciones impuestas explicadas anteriormente en el punto 3. Quedando la estructura previa al estudio de la siguiente manera:



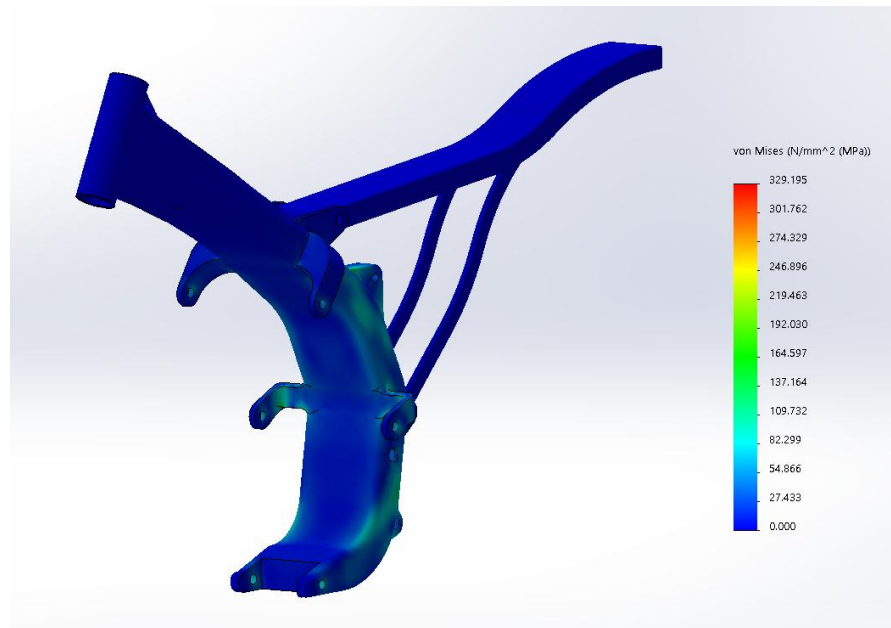
**Figura 160.** Chasis previo a la simulación en el caso de salto trasero

Tras realizar el estudio se obtienen los siguientes resultados:

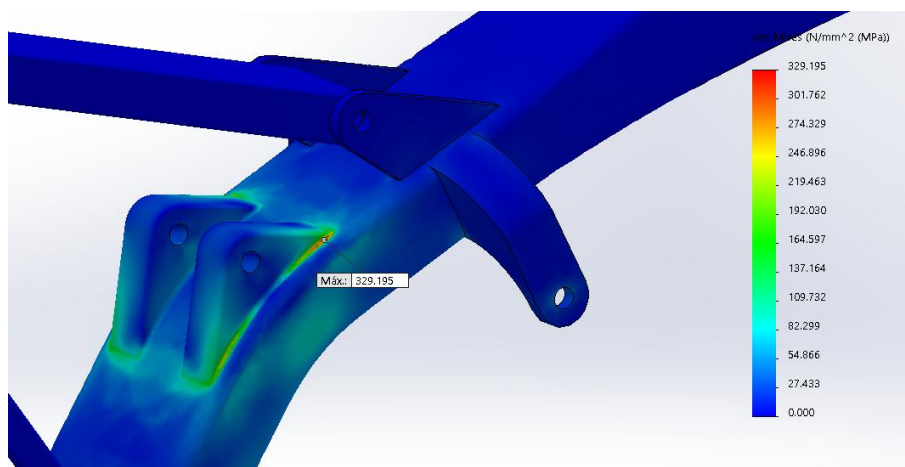
- Tensión de Von Mises



**Figura 161.** Tensiones en el chasis estudio de salto trasero vista 1



**Figura 162.** Tensiones en el chasis estudio de salto trasero vista 2

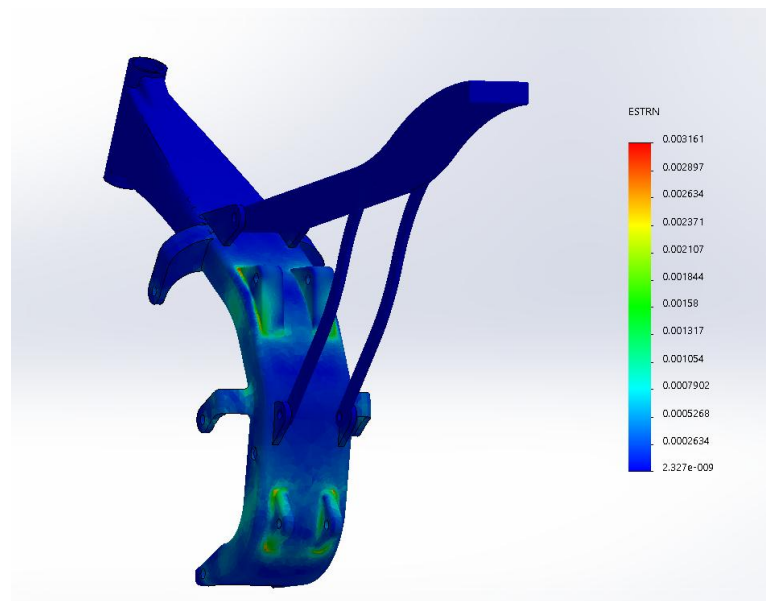


**Figura 163.** Tensión máxima en el chasis estudio de salto trasero

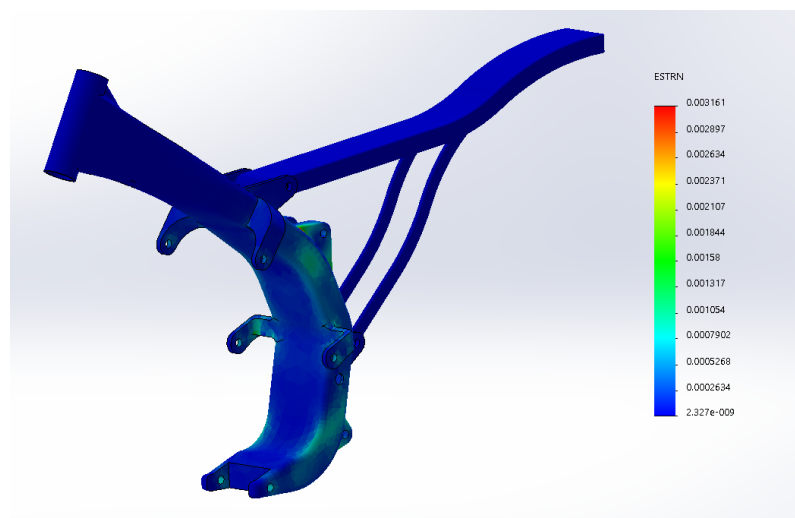
Se puede observar en los gráficos anteriores como la tensión máxima de este caso crítico está por debajo del límite elástico, pero ya no está tan lejana como en los tres primeros casos de estudio primeros. Esto se debe a los grandes esfuerzos que tiene que soportar el bastidor cuando vuelve a tomar contacto con el suelo tras realizar un salto. Se observa que aunque el valor de la tensión máxima es alto el comportamiento de la estructura ante esta situación será totalmente correcto y no se producirá fallo.

La máxima tensión se produce en la unión de algunos anclajes con la estructura principal, estos anclajes han sido reforzados previamente para asegurar que no se producirá una rotura bajo unas condiciones de uso normal. Cabe destacar que al concentrarse tanto la tensión máxima en pocos puntos concretos también puede ser debido a la inexactitud ocasional del software y es posible que la tensión máxima no tenga un valor tan alto y esté más repartida por las zonas próximas a los puntos.

- Deformación



**Figura 164.** Deformación en el chasis estudio de salto trasero vista 1

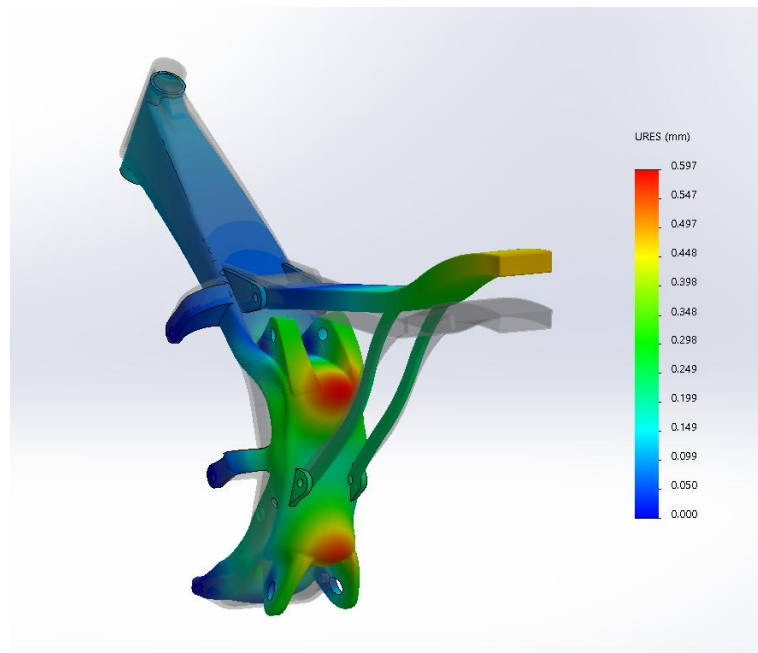


**Figura 165.** Deformación en el chasis estudio de salto trasero vista 2

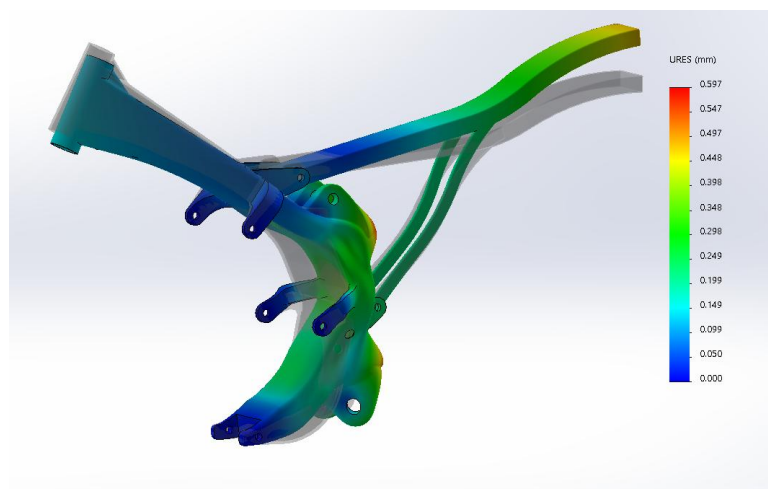
En estos gráficos donde se muestra la deformación de la estructura se puede ver en qué zonas sufrirá mayor deformación la estructura y en cuales menos. Observando también que en las zonas que más se deforman no sufren una deformación trascendente pero ya los valores de esta no son ínfimos.

Las máximas deformaciones se producen en las mismas zonas que donde se producen las tensiones máximas.

- Desplazamientos



**Figura 166.** Desplazamiento en el chasis estudio de salto trasero vista 1



**Figura 167.** Desplazamiento en el chasis estudio de salto trasero vista 2

En estos gráficos se observa cómo se va a desplazar la estructura al aplicarle el esfuerzo correspondiente. Para poder observar mejor este fenómeno se ha aplica una escala de deformación 13:1.

El máximo desplazamiento se da en la zona de la pipa de la dirección consecuencia de los esfuerzos aplicados en dicho punto para el estudio, que lo hacen levantarse.

- Coeficiente de seguridad

Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Automático  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 1.5

**Figura 168.** FDS en el chasis estudio de salto trasero

Al observar los resultados anteriores ya se esperaba un resultado del fds como el obtenido. El resultado obtenido sigue siendo adecuado y cumple con todos los requisitos necesarios, por lo que se asegura que la estructura tendrá un buen comportamiento.

## 6. Estudio del chasis a fatiga

La obtención o cálculo de la vida a fatiga goza de gran importancia sobre todo en ciertos materiales metálicos, este es el caso del material de este proyecto, el aluminio. Este estudio es importante a largo plazo, ya que estima la vida que tendrá una pieza hasta que falle cuando se encuentra sometida a unos determinados ciclos de carga y descarga.

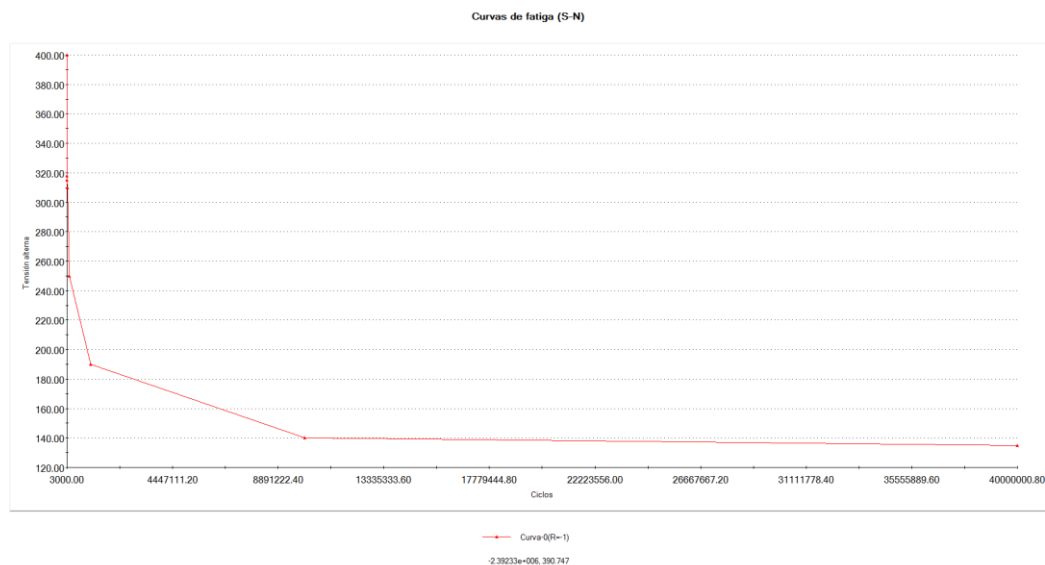
Cada ciclo de fluctuación de la tensión afecta produciendo un pequeño daño añadido a la pieza y después de una determinada cantidad de ciclos tendrá lugar la rotura de la pieza por fatiga [22].

Hay que destacar la existencia de ciertos casos en los que se aplica un valor de tensión que está por debajo de un límite y en los que nunca se llegará a producir la rotura aunque se le aplicara un número de ciclos infinito. A esto se le llama vida infinita.

Los datos obtenidos en los estudios estructurales estáticos anteriores se usan como dato de partida para definir así el estudio de fatiga. La cantidad de ciclos necesarios para que se produzca el fallo por fatiga es función del material y de la fluctuación de tensiones. Esta información es recogida en la gráfica denominada “Curva S-N”, disponible para.

Una definición por la cual se puede entender bien el concepto de vida a fatiga sería el siguiente: la vida a fatiga es el fallo producido por cargas repetitivas cuyo proceso se basa en la iniciación y posterior propagación de una grieta o conjunto de ellas hasta llegar a producir el fallo final por medio de la fractura.

Para el material con el que ha sido diseñado el software usado ofrece la siguiente curva S-N:



**Figura 169.** Curva S-N del Aluminio 7075 T6



La vida a fatiga se puede obtener manualmente con la curva S-N del material, metiendo en la gráfica el valor del esfuerzo y sacando el número de ciclos de vida. En este proyecto se ha preferido hacer el cálculo por el método de elementos finitos con el mismo programa que se lleva usando hasta el momento para conseguir mayor exactitud de los resultados, este programa es el SolidWorks v2015.

En este caso de estudio se va a calcular la vida a fatiga que tendrá el chasis diseñado. Este cálculo se va a realizar en función de las carreras que podrá aguantar el chasis sin producir fallo por fatiga. Se va a suponer que la motocicleta sólo se va a ser destinada a correr carreras de moto-cross de tipo profesional y que no va a ser usada para ningún otro fin.

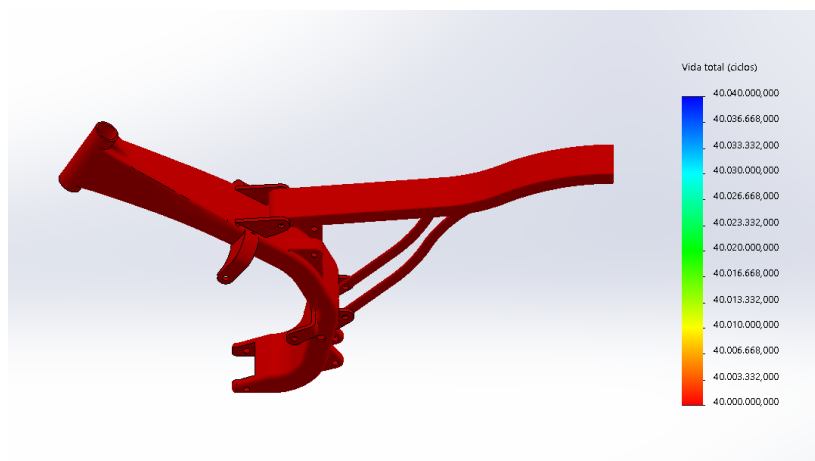
Entonces para la realización del cálculo lo primero que se ha hecho es una media de los esfuerzos de cada tipo que se producen en una carrera profesional común. Para ello entonces hay que saber que una carrera suele tener 20 vueltas, y que en cada vuelta se producen las siguientes situaciones críticas:

- 1 Salto apoyando primero la rueda delantera al caer
- 4 Saltos apoyando primero la rueda trasera al caer
- 8 Frenadas extremas
- 12 Pasos por curva
- 16 Aceleraciones máximas

Se va a establecer que cada una de estas situaciones fuera una situación extrema como la de los casos críticos estudiadas anteriormente. De esta manera se realizaría el estudio utilizando el caso más desfavorable para así obtener un valor de vida a fatiga seguro.

Se realiza el estudio de fatiga de cada caso por separado obteniendo los siguientes resultados:

- Frenada máxima

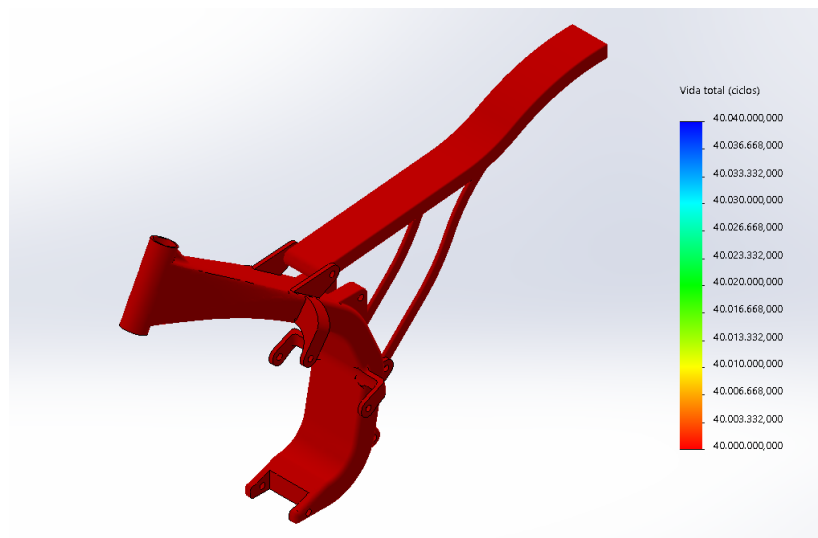


**Figura 170.** Estudio de fatiga en el caso de frenada máxima

Para hallar este resultado previamente se ha calculado que cada vuelta de la carrera tiene 8 frenadas máximas y que cada carrera tiene 20 vueltas, entonces se obtiene un total de 160 frenadas máximas por carrera. Este dato se ha introducido en el software para realizar el cálculo y el resultado obtenido es el número de carreras que aguantará el chasis sin producir fallo por fatiga.

El resultado que ofrece el software en este caso es de 40.000.000 ciclos o carreras. Observando la curva S-N del material ofrecida por el programa se puede ver que da este resultado debido a que toma este valor como el máximo de ciclos. Entonces esto se puede traducir esto como que el chasis tendrá vida infinita, es decir, nunca fallará por fatiga aunque se le someta en infinitas ocasiones a este esfuerzo.

- Aceleración máxima

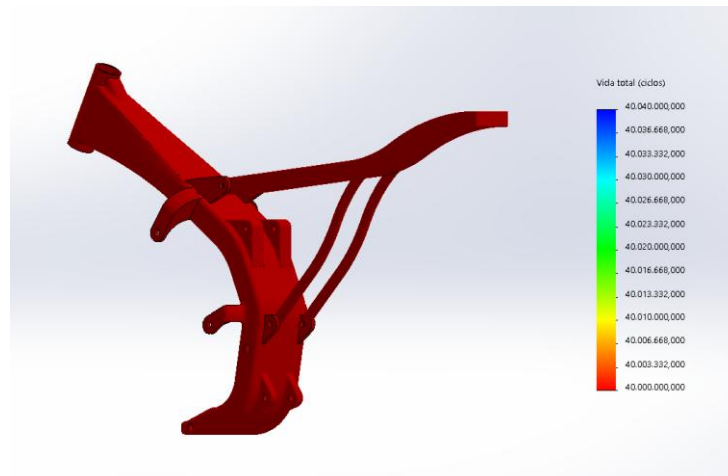


**Figura 171.** Estudio de fatiga en el caso de aceleración máxima

Como anteriormente, se ha calculado previamente que cada vuelta de la carrera tiene 16 aceleraciones máximas y que cada carrera tiene 20 vueltas, entonces se obtiene un total de 320 aceleraciones máximas por carrera. Este dato se ha introducido en el software para realizar el cálculo.

El resultado que ofrece el software en este caso es de 40.000.000 ciclos o carreras. Entonces como se ha explicado en el caso anterior se puede traducir como que el chasis tendrá vida infinita.

- Paso por curva

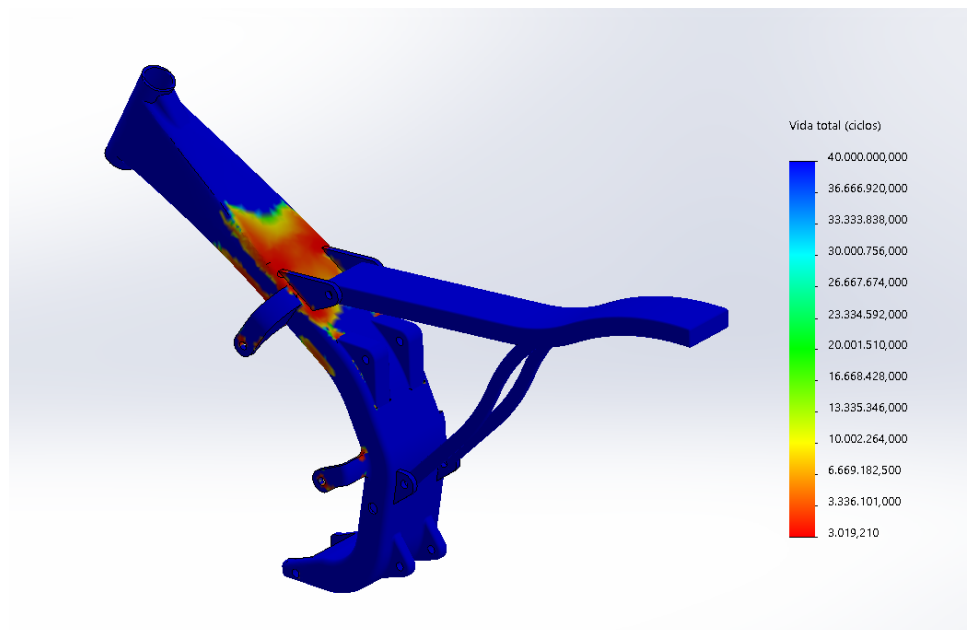


**Figura 172.** Estudio de fatiga en el caso de paso por curva

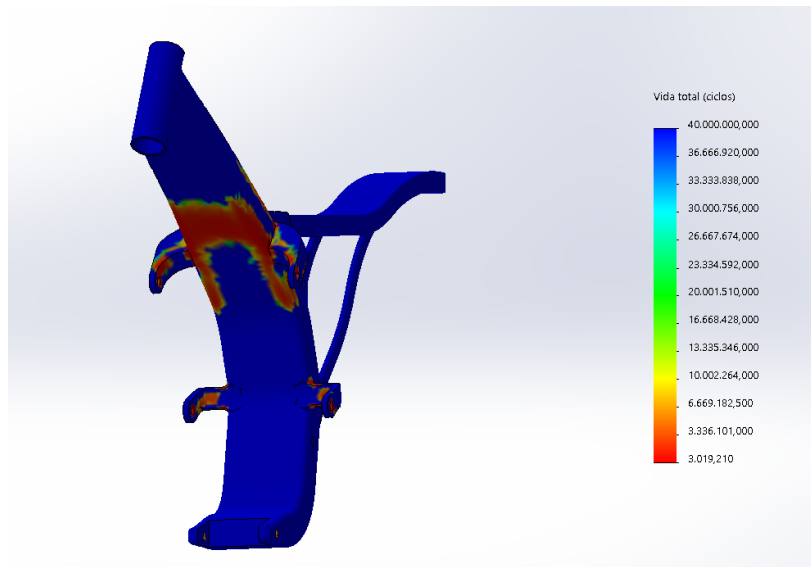
Como antes, se ha calculado previamente que cada vuelta de la carrera tiene 12 pasos por curva y que cada carrera tiene 20 vueltas, entonces se obtiene un total de 240 pasos por curva por carrera. Este dato se ha introducido en el software para realizar el cálculo.

El resultado que ofrece el software en este caso es de 40.000.000 ciclos o carreras. Entonces como se ha explicado en el primer caso se puede traducir cómo que el chasis tendrá vida infinita.

- Salto apoyando primero la rueda delantera en el suelo



**Figura 173.** Estudio de fatiga en el caso de salto delantera vista 1

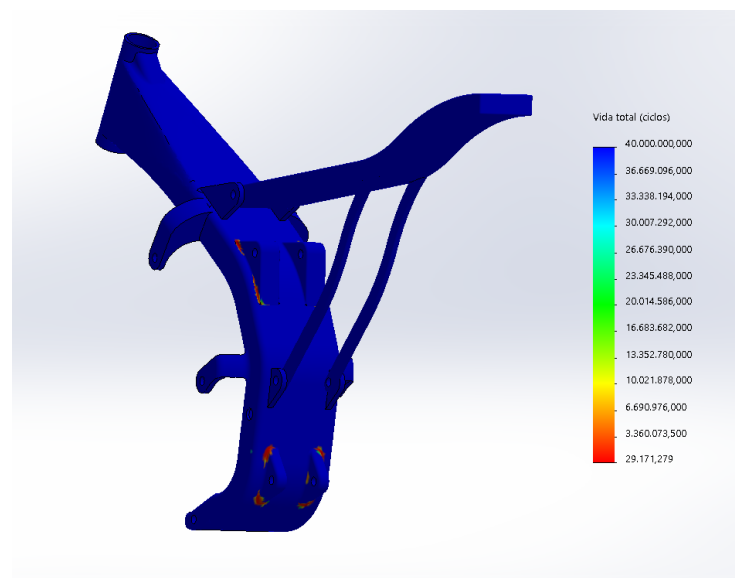


**Figura 174.** Estudio de fatiga en el caso de salto delantera vista 2

Como antes, se ha calculado previamente que cada vuelta de la carrera tiene 1 salto cayendo primero con la rueda delantera y que cada carrera tiene 20 vueltas, entonces se obtiene un total de 20 saltos cayendo primero con la rueda delantera por carrera. Este dato se ha introducido en el software para realizar el cálculo.

El resultado que ofrece el software en este caso es de 3.019 ciclos o carreras. Este caso ya cambia con respecto al resto, ya que en este caso no tiene vida infinita, el bastidor sólo tendrá una vida de 3.019 carreras aplicando este caso.

- Salto apoyando primero la rueda trasera en el suelo



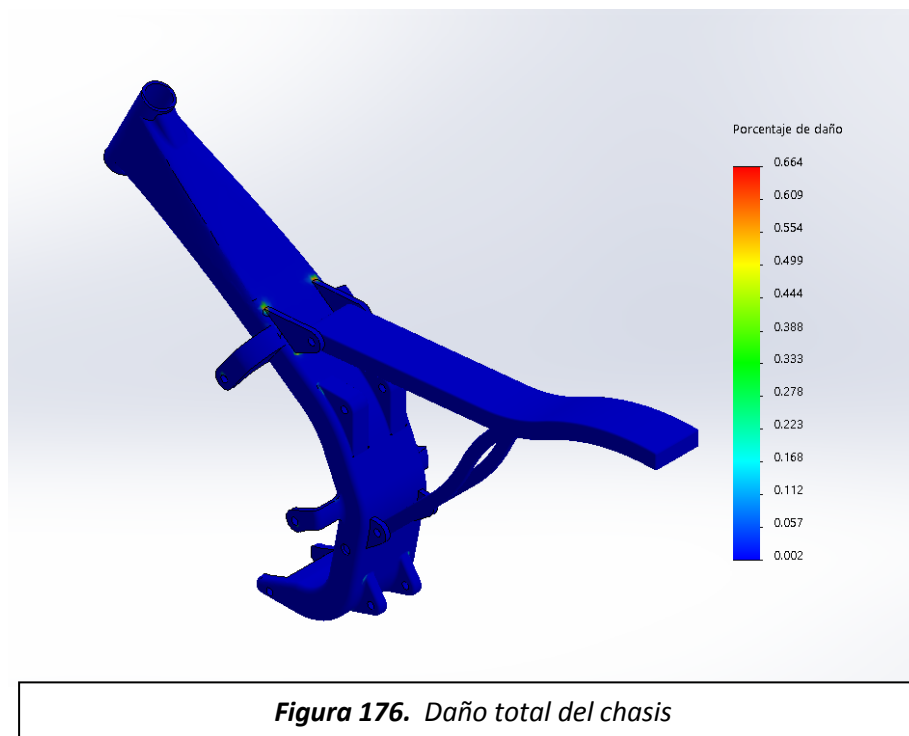
**Figura 175.** Estudio de fatiga en el caso de salto trasera

Como antes, se ha calculado previamente que cada vuelta de la carrera tiene 4 saltos cayendo primero con la rueda trasera y que cada carrera tiene 20 vueltas, entonces se obtiene un total de 80 saltos cayendo primero con la rueda trasera por carrera. Este dato se ha introducido en el software para realizar el cálculo.

El resultado que ofrece el software en este caso es de 29.171 ciclos o carreras. Este caso ya cambia con respecto al resto, ya que tras este no tiene vida infinita, el bastidor tendrá una vida de 29.171 carreras aplicando este caso.

Una vez realizados todos los estudios de fatiga de cada caso podemos concluir que el bastidor sólo fallara por fatiga en los casos de salto, en el resto de casos tendrá vida infinita.

Tras calcular la cantidad de ciclos para el fallo para cada rango o amplitud, se lleva a cabo el cálculo del daño. El daño total se halla realizando un sumatorio del daño provocado por cada rango. Se obtiene el siguiente resultado para el daño total.



Se obtiene un daño total de 0,00664. Con este fallo se halla la vida total del bastidor, esta es la inversa del daño total. Se obtiene entonces una vida total de 150 carreras. Entonces este chasis tendrá una vida útil de 150 carreras, a partir de esa cifra de carreras ya no será un chasis fiable. Hay que recordar que todos los estudios se han realizado utilizando los supuestos más desfavorables, por lo que es altamente probable que el chasis aguante un número de carreras mayor al hallado.

## V. Conclusiones

El objetivo por el cual se decidió realizar este proyecto fue la idea de llevar a cabo un concepto innovador, un concepto que salvo un pequeño número de prototipos no se había llevado a cabo. Esta idea innovadora era el diseño y prueba de un chasis monoviga para una motocicleta off-road.

En este estudio o proyecto se ha profundizado mucho en el mundo teórico de las motocicletas, y en especial en la parte estructural de las mismas. Se ha podido observar cómo se puede realizar el diseño de un bastidor de motocicleta siguiendo unos pasos claros para su realización.

### 1. Conclusiones generales

El objetivo de este proyecto era el diseño del chasis monoviga logrando obtener una estructura lo más optimizada posible. Esto significa la consecución de un diseño que cumpliera básicamente con lo siguiente:

- Mínimo peso: Se partió de una idea inicial de chasis que se fue modificando para disminuir su masa hasta conseguir la estructura menos pesada que presentara un buen comportamiento. El diseño final cuenta con un peso 9,69 kg para el bastidor y 1,89 kg para el subchasis.

Al conseguir este peso tan óptimo se reduce el peso del conjunto total de la motocicleta consiguiendo unas mejores prestaciones y un mejor manejo de la misma.

- Mínima deformación: Se han conseguido unas deformaciones mínimas de la estructura de forma que tendrá un buen comportamiento durante su uso y será más seguro el uso de la motocicleta para el piloto.

La estructura debe también ser funcional, esto era una premisa ya cumplida al diseñar un chasis que tuviera unas dimensiones concretas para encajar a la perfección en una motocicleta comercial.

En este proyecto se ha cumplido con lo esperado y se ha conseguido una estructura funcional lo más optimizada posible siendo un proyecto realista, es decir, un proyecto

teórico pero que, al utilizar un material común como es el aluminio, se podría llevar a cabo en el momento que se decidiera sin necesidad de contar con un gran presupuesto.

Entonces se puede hacer una evaluación final muy positiva del proyecto, ya que la parte teórica cumple con todos lo necesario para poder tener un buen comportamiento si se llevara a cabo su fabricación.

Al partir de una motocicleta comercial y queriendo sólo modificar el bastidor hay que tener en cuenta que se presentan más complicaciones al diseñar y optimizar el bastidor. Esto es debido a las restricciones dimensionales que tiene el nuevo bastidor para poder acoplarlo con el resto de componentes de la motocicleta como lo hacía el bastidor original.

También cabe destacar que al modificar un modelo ya fabricado hay que tener en cuenta si hay que realizar alguna modificación a parte de la modificación objeto del proyecto. En este caso en particular se observó que al modificar el anclaje del basculante sería necesario diseñar un cubrecadena y así se hizo.

## 2. Futuras líneas de trabajo

En un futuro se podría llevar a la realidad el proyecto fabricando un prototipo de chasis y montándolo en el modelo para el cuál ha sido diseñado. Sería entonces cuando se podrían corroborar todos los cálculos teóricos realizados probándolos en la realidad.

Para poder llevar a cabo el proyecto a la realidad habría que estudiar el método de fabricación intentando conseguir un método óptimo lo más económico posible. La fabricación de un prototipo requeriría un cierto presupuesto, ya que la fabricación de una o pocas unidades siempre tiene un coste elevado.

Tras los resultados tan positivos obtenidos en este estudio se podría realizar de manera muy sencilla el diseño de un chasis para una motocicleta de trial. Para poder llevar a cabo ese estudio sólo haría falta rediseñar el chasis usando la misma idea base que en este proyecto y modificar los cálculos pero usando de base los que ya se han hecho, ya que sólo variarían mínimamente los esfuerzos.

## VI. Bibliografía

### **Bibliografía**

- [1] FOALE, Tony: *MOTOCICLETAS. Comportamiento dinámico y diseño de chasis: el arte y la ciencia*. Madrid: Ed. Tony Foale, 2003.
- [2] ARIAS-PAZ GUITIAN, Manuel: *Motocicletas*. Madrid: Ed. Dossat, 2003. 32ª Edición.
- [3] BRADLEY, John: *The Racing Motorcycle volume I*. Inglaterra: Ed. Broadland Leisure Publications, 2002.
- [4] BRADLEY, John: *The Racing Motorcycle volume II*. Inglaterra: Ed. Broadland Leisure Publications, 2003.
- [5] ROBINSON, John: *Motorcycle Tuning: Chassis*. Inglaterra: Ed. Butterworth-Heinemann, 1994. 2ª Edición.
- [6] COSSALTER, Vittore: *Motorcycle Dynamics*. EEUU: Ed. LULU, 2006. 2ª Edición.
- [7] COCCO, Gaetano: *Motorcycle Design and technology*. Milán: Ed. Giorgio Nada, 2004.

### **Tesis y proyectos fin de carrera**

- [8] DORADO GARCÍA, Raúl: *Pre-diseño, cálculo y evolución del chasis de una motocicleta de competición*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
- [9] VERGARA CULEBRAS, Patxi: *Modelado, análisis y simulación de un chasis de motocicleta*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [10] COLÁS ESCANDÓN, Yolanda: *Prototipo de chasis para motostudent: Diseño y estudio*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [11] AYLLÓN ESCUDERO, Manuel: *Rediseño del chasis de una motocicleta: Ducati Monster S2R 800*. Madrid: Universidad pontificia de Comillas, 2013.



- [12] LARRAURI GARCÍA, Asier: *Diseño y estudio de modificación de chasis y basculante de una motocicleta*. Navarra: Universidad Pública de Navarra, 2012.
- [13] *Diseño y de una motocicleta para la marca Suzuki*. Barcelona: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.

### **Referencias web**

- [14] <http://www.honda.es/motorcycles/range/off-road/crf250r-2016/overview.html> (último acceso 04/02/2016).
- [15] <http://www.beevoz.com/2015/04/08/historia-de-la-motocicleta-origenes-evolucion-y-tipos/> (último acceso 07/02/2016).
- [16] [http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala\\_prensa/revista\\_tecnica/hemeroteca/articulos/R51\\_A2.pdf](http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R51_A2.pdf) (último acceso 15/02/2016).
- [17] <http://www.solidworks.es/sw/products/3d-cad/packages.htm> (último acceso 05/03/2016).
- [18] [http://www.solidworks.com/sw/docs/Student\\_WB\\_2011\\_ESP.pdf](http://www.solidworks.com/sw/docs/Student_WB_2011_ESP.pdf) (último acceso 06/03/2016).
- [19] <http://motobancadalaser.com/-que-es-un-chasis-de-moto-.html> (último acceso 20/03/2016).
- [20] <https://almec.files.wordpress.com/2007/10/resumen.pdf> (último acceso 10/04/2016).
- [21] <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html> (último acceso 15/04/2016).
- [22] <http://www.iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm> (último acceso 16/05/2016).

# Presupuesto

A continuación se va a exponer el presupuesto en el cuál se muestran los recursos necesarios, tanto personales como no personales que han sido necesarios para llevar a cabo la realización del proyecto. Se detalla posteriormente también el número de horas de trabajo de cada recurso así como su coste económico.

El único recurso personal utilizado ha sido el trabajo del ingeniero que ha realizado todo el proyecto, esta persona es Yago Núñez Gamoneda. Este ingeniero entra en la categoría de ingeniero junior y posee el título de Ingeniero Mecánico.

Los recursos no personales utilizados son un equipo informático con su correspondiente software y licencias:

- El equipo informático utilizado es un ordenador de la marca ASUS modelo G771JM-009H.
- Los software con sus correspondientes licencias utilizados son el paquete Windows 2010, el paquete Microsoft Office 2010 y el paquete SolidWorks 2015.

Para la realización del proyecto no ha sido necesaria la subcontratación de ningún servicio. Tampoco se contemplan a la hora de calcular el presupuesto ningún coste indirecto.

El proyecto ha tenido una duración de 6 meses, en los cuáles se le ha dedicado al proyecto 230 horas.

El precio de la mano de obra de un ingeniero junior es de 32€ por hora.

El presupuesto detallado queda configurado de la siguiente manera:

- Equipo y software
  - Equipo ..... 900€
  - Software.....2.300€
- Mano de obra
  - Medición y planteamiento (60 horas).....1.920€
  - Diseño (90 horas).....2.880€
  - Simulación (80 horas).....2.560€

**TOTAL.....10.540€**

El presupuesto de este proyecto asciende a la cantidad de **DIEZ MIL QUINIENTOS CUARENTA EUROS**.

# Planos

